

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**PROPOSTA DE REMEDIAÇÃO DE ÁREA CONTAMINADA
POR DERIVADOS DE HIDROCARBONETOS – ESTUDO DE
CASO PARA UM POSTO DE ABASTECIMENTO NO
DISTRITO FEDERAL**

LUCAS BEZERRA SISNANDO

ORIENTADOR: ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
AMBIENTAL**

BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO / 2018

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**PROPOSTA DE REMEDIAÇÃO DE ÁREA CONTAMINADA
POR DERIVADOS DE HIDROCARBONETOS – ESTUDO DE
CASO PARA UM POSTO DE ABASTECIMENTO NO
DISTRITO FEDERAL**

LUCAS BEZERRA SISNANDO

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

APROVADA POR:

**Prof. ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, D.Sc. (ENC/FT/UnB)
(ORIENTADOR)**

**Prof. LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, D.Sc. (ENC/FT/UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**Prof. LUCIANO SOARES DA CUNHA, D.Sc. (GEO/IG/UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

BRASÍLIA/DF, 07 DE DEZEMBRO DE 2018.

“Ninguém educa ninguém, como tampouco
ninguém se educa a si mesmo: os homens se educam em
comunhão, mediatizados pelo mundo.”

Paulo Freire

FICHA CATALOGRÁFICA

SISNANDO, LUCAS BEZERRA

Proposta de Remediação de Área Contaminada por Derivados de Hidrocarbonetos – Estudo de Caso para um Posto de Abastecimento no Distrito Federal. Distrito Federal, 2018.

x, 69 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2018)

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|-----------------------------------|-------------------------|
| 1. Técnicas de Remediação de Solo | 2. BTEX |
| 3. Área Contaminada | 4. Posto de Combustível |
| I. ENC/FT/UnB | |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SISNANDO, L.B. (2018). Proposta de Remediação de Área Contaminada por Derivados de Hidrocarbonetos – Estudo de Caso para um Posto de Abastecimento no Distrito Federal. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 85 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Lucas Bezerra Sisnando

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Proposta de Remediação de Área Contaminada por Derivados de Hidrocarbonetos – Estudo de Caso para um Posto de Abastecimento no Distrito Federal.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Lucas Bezerra Sisnando

SIG, Quadra 8, Primeira Avenida, 2396,
apt. 216. 70.610-480 – Brasília/DF – Brasil

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e ao plano espiritual por toda saúde, proteção e boas energias.

Agradeço aos meus pais, Carlos e Márcia, e aos meus irmãos, Laís, Júlia e Luiz, por todo ensinamento, incentivo e paciência.

Agradeço a minha melhor amiga, namorada e mãe do meu filho, Gabriela, por todo amor e carinho, por apoio incondicional, e por aguentar as minhas loucuras e muitas vezes fazer parte delas.

Ao meu filho, Tomás, por dar sentido à vida.

Ao meu orientador, Professor André Brasil, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas orientações e incentivos.

Ao grupo de orientados do Professor André, em especial ao Felipe, por todas as dicas e orientações.

Aos meus amigos de graduações, que tornaram esse período da minha vida único e que lembrarei para sempre.

Ao Simba, por todo amor e amizade.

RESUMO

Postos de abastecimento são o principal foco de contaminação de solo e águas subterrâneas por derivados de petróleo. Tal contaminação ocorre devido a má operação de postos de combustíveis como também vazamentos existentes nos tanques de armazenamento do mesmo. A elevada toxicidade desses contaminantes apresentam sérios riscos de degradação ambiental, além disso, a depender do tipo de contaminante, também pode ser tóxico aos seres humanos, como é o caso do composto BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos), composto reconhecidamente tóxico que apresenta toxicidade crônica mesmo que em pequenas concentrações, podendo levar a lesões do sistema nervoso central. O benzeno é reconhecidamente o mais tóxico, estando associado ao surgimento de cânceres. Outra grande preocupação com esse tipo de contaminação diz respeito à contaminação do lençol freático, já que a contaminação do aquífero pode comprometer todo o sistema de abastecimento de água da região. Este trabalho tem como objetivo propor uma técnica de remediação, ou um conjunto delas, para um posto de combustível localizado em Brasília-DF. A contaminação por derivados de combustíveis fósseis foi comprovada por análise de água subterrânea em março de 2006, em que foram detectadas concentrações de benzeno em desacordo com a legislação ambiental. Em 2013 iniciou-se um processo de remediação da área sendo concluído em 2016. No ano passado foi constatado o retorno da pluma de contaminação de fase livre. Exalta-se a necessidade de remediação dessas áreas, tendo em vista o perigo que estas apresentam para o meio ambiente e para a saúde da população, além da necessidade de atendimento à legislação ambiental vigente. Foi escolhida a técnica *air sparging* em conjunto com a técnica extração de vapor do solo. A associação de tecnologias de tratamento escolhida para remediação do posto em estudo levou em consideração o histórico de contaminação, as características físicas e químicas do contaminante, as características físicas do solo, o tipo de solo, a extensão e a localização da pluma de contaminação, a presença de contaminante em fase livre, a direção de fluxo e a profundidade do lençol freático. Além da existência de poços perfurados no local contaminado, tornando o processo de remediação menos oneroso. Ademais, foi realizada uma coleta de água do córrego mais próximo do empreendimento para análise de BTEX e PAH, o qual se encontrou em conformidade com os valores máximos desses parâmetros definidos pela legislação ambiental.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. JUSTIFICATIVA	2
1.2. OBJETIVO	2
1.3. DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. CONTAMINAÇÃO POR DERIVADOS DE HIDROCARBONETOS	4
2.2. CARCINOGENICIDADE DO BTEX	4
2.3. DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DE ÁREAS CONTAMINADAS	5
2.4. TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO <i>IN SITU</i> PARA CONTAMINAÇÕES PROVOCADAS POR COMBUSTÍVEIS	7
2.4.1. <i>Air Sparging</i>	7
2.4.2. Atenuação Natural Monitorada	10
2.4.3. Biorremediação	11
2.4.4. Bioventing	15
2.4.5. Extração Multifásica (MPE)	16
2.4.6. Extração de Vapor do Solo (EVS)	18
2.4.7. Tratamento Térmico	20
3. METODOLOGIA	22
4. RESULTADOS OBTIDOS	30
4.1. AVALIAÇÃO PRELIMINAR	30
4.1.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	30
4.1.2. HISTÓRICO DE CONTAMINAÇÃO DO POSTO	33
4.1.3. CARACTERIZAÇÃO PEDOLÓGICA	41
4.1.4. DIREÇÃO DE FLUXO SUPERFICIAL	44
4.1.5. NÍVEL FREÁTICO	46
4.2. INVESTIGAÇÃO DETALHADA	46
4.2.1. ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE POLUENTES ..	47
4.2.2. ANÁLISE DE QUALIDADE DE ÁGUA – CÓRREGO DA PONTE	57
4.2.3. CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO	60
5. PROPOSTA DE SISTEMA DE REMEDIAÇÃO AMBIENTAL	63
6. CONCLUSÃO	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Fluxograma das etapas de avaliação de passivo ambiental (ABNT, 2007).....	6
Figura 2.2. Esquema de funcionamento da técnica Air Sparging (Bechara, 2004).	8
Figura 2.3. Processo de decomposição do contaminante pela ação dos microrganismos (modificado – EPA, 1996).	12
Figura 2.4. Variação da atividade biológica com a variação do pH (Tate, 1995).....	14
Figura 2.5. Variação da atividade respiratória dos microrganismos com a variação de temperatura (Tate, 1995).	14
Figura 2.6. Esquematização da aplicação conjunta das técnicas biosparging e <i>bioventing</i> , sendo biosparging à esquerda e <i>bioventing</i> à direita (modificado – EPA, 1994).....	16
Figura 2.7. Ilustração da técnica de extração de vapor do solo em conjunto com a técnica <i>air sparging</i> (modificado - Khan <i>et al.</i> , 2004).....	19
Figura 2.8. Sistema de tratamento térmico com tratamento de gases <i>in loco</i> (modificado - EPA, 2012).	21
Figura 3.1. Fluxograma representativo da metodologia para escolha de sistema de remediação ambiental.	23
Figura 3.2. Área de coleta da amostra de água para análise de contaminantes.....	25
Figura 3.3. Procedimento de coleta de amostra de água do córrego da Ponte.	25
Figura 3.4. Amostra pronta para realização do ensaio de limite de liquidez.	27
Figura 3.5. Amostra após três batidas.	27
Figura 3.6. Amostra durante ensaio do limite de plasticidade.	27
Figura 3.7. Solo separado para realização do ensaio de granulometria.	28
Figura 3.8. Ensaio de granulometria com e sem defloculante.	28
Figura 3.9. Realização de ensaios de permeabilidade com carga variável.	28
Figura 4.1. Vista lateral do posto em estudo.	31
Figura 4.2. Mapa de localização do posto.	32
Figura 4.3. Esquema de funcionamento do sistema de remediação ambiental (TECPAM, 2013).....	39
Figura 4.4. Provável pluma de fase livre existente no posto (TECPAM, 2017).	40
Figura 4.5. Mapa Pedológico do posto.	43
Figura 4.6. Mapa da direção de fluxo do posto e entorno.	45
Figura 4.7. Mapa de localização do ponto de coleta de água do córrego da Ponte para análise de BTEX e PAH.	58
Figura 4.8. Curva granulométrica do solo do posto.	60
Figura 4.9. Perfil de umidade obtido na sondagem de junho de 2018.	62
Figura 5.1. Modelo conceitual de funcionamento do sistema de remediação AS/EVS (Viana Jr <i>et al.</i> , 2004).....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Vantagens e desvantagens do método biosparging (EPA, 1994).	16
Tabela 2.2 Vantagens e desvantagens da técnica de remediação extração multifásica (MPE) (modificado – EPA, 1999).	18
Tabela 2.3 Vantagens e desvantagens do método extração de vapores do solo (EVS) (EPA, 1994b).....	20
Tabela 3.1. Descrição das amostras coletadas durante a sondagem. Profundidades assinaladas com “*” foram feitas de forma mecanizada.	26
Tabela 4.1. Análise de água dos poços de monitoramento para os parâmetros BTEX e PAH realizada em março de 2006, dados em (µg/L).	34
Tabela 4.2. Nível freático para diferentes poços de extração e monitoramento, Fullgeo Diagnóstico e Remediação Ambiental, 2011.	46
Tabela 4.3. Análise de água dos poços de monitoramento para os parâmetros BTEX e PAH realizada em janeiro de 2015, dados em (µg/L).	49
Tabela 4.4. Análise de água dos poços de extração para os parâmetros BTEX e PAH realizada em janeiro de 2015, dados em (µg/L).	50
Tabela 4.5. Análise de água dos poços de monitoramento para os parâmetros BTEX e PAH realizada em julho de 2016, dados em (µg/L).	51
Tabela 4.6. Análise de água dos poços de extração para os parâmetros BTEX e PAH realizada em julho de 2016, dados em (µg/L).	52
Tabela 4.7. Análise de água dos poços de monitoramento para os parâmetros BTEX e PAH realizada em março de 2017, dados em (µg/L).	53
Tabela 4.8. Análise de água dos poços de extração para os parâmetros BTEX e PAH realizada em março de 2017, dados em (µg/L).	54
Tabela 4.9. Análise de água superficial para os parâmetros BTEX e PAH realizada em novembro de 2018 no córrego da Ponte, dados em (µg/L).	59

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AI	Área contaminada sob investigação
AS	<i>Air Sparging</i>
BTEX	Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CHC	Compostos de Hidrocarbonetos Clorados
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COV	Composto Orgânicos Voláteis
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
e-SIC	Sistema Eletrônico do Serviço de Informação ao Cidadão
EVS	Extração de Vapor do Solo
FRTR	<i>Federal Remediation Technologies Roundtable</i>
HPA	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
HTP	Hidrocarbonetos Totais de Petróleo
IBRAM	Instituto Brasília Ambiental
MDE	Modelo Digital de Elevação
MPE	Extração Multifásica
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PE	Poço de Extração
PM	Poço de Monitoramento
SAO	Caixa Separadora de Água e Óleo
SEGETH	Secretaria de Estado de Gestão do Território e Habitação
SEI	Sistema Eletrônico de Informações
SIG	Sistema de Informações Geográficas
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América

1. INTRODUÇÃO

Em todo mundo, em particular nas grandes cidades, tem crescido a preocupação ambiental com as atividades de revenda e de abastecimento de combustíveis, uma vez que tais atividades apresentam um alto potencial poluidor do solo e da água subterrânea. Os produtos derivados de petróleo, como a gasolina e o óleo diesel, representam uma importante fonte de contaminação do meio ambiente nos centros urbanos (Oliveira, E., 1992).

No Brasil, existem cerca de 27.000 postos de combustíveis, os quais podem provocar impacto sobre os recursos aquáticos, principalmente envolvendo águas subterrâneas. Em função de muitos tanques terem mais de 25 anos de uso, acredita-se que a possibilidade de ocorrerem vazamentos é extremamente grande, principalmente pelo surgimento de rachaduras ou corrosão (Tiburtius *et. al.*, 2004).

Os principais focos de contaminação segundo o órgão de controle ambiental paulista, a CETESB, são os postos de combustíveis, o setor industrial e a atividade comercial. Dentre esses, os postos de combustíveis são os principais responsáveis pelos focos de contaminação e foram os causadores de 73% dos casos de áreas contaminadas no Estado de São Paulo entre o ano de 2002 e 2016, o que corresponde a 4.137 áreas contaminadas. A atividade industrial foi responsável por 18% (1.002 áreas contaminadas) dos registros de contaminação e o setor comercial 5% (300 áreas contaminadas) (CETESB, 2016).

Constatada a poluição, a descontaminação do local ocorre por meio do emprego de técnicas de remediação que possuem o objetivo de reduzir as concentrações dos poluentes até limites aceitáveis, exigidos pela legislação ambiental. Os poluentes podem estar presentes tanto no solo quanto na água subterrânea, fato que gera preocupação com a população próxima à contaminação e com o meio ambiente que a circunda. Após a descontaminação do local, a área deve ser monitorada periodicamente para evitar que novas contaminações possam ocorrer.

Este projeto final trata-se de um estudo de caso de um posto de gasolina em Brasília - DF. O objetivo deste trabalho é propor uma técnica de remediação para descontaminação efetiva do local, que se encontra poluído há aproximadamente 12 anos. A solução de remediação para o Posto em análise foi proposta com base nas características do local contaminado e no histórico de contaminação.

1.1.JUSTIFICATIVA

A origem das áreas contaminadas está relacionada ao desconhecimento, em épocas passadas, de procedimentos seguros para o manejo de substâncias perigosas, ao desrespeito a esses procedimentos seguros e à ocorrência de acidentes ou vazamentos durante o desenvolvimento dos processos produtivos, de transporte ou de armazenamento de matérias primas e produtos (CETESB, 2016).

A existência de uma área contaminada pode gerar problemas, como danos à saúde, comprometimento da qualidade dos recursos hídricos, restrições ao uso do solo e danos ao patrimônio público e privado, com a desvalorização das propriedades, além de danos ao meio ambiente (CETESB, 2016). Além disso, a contaminação de áreas localizadas próximas às cidades tem sido motivo de preocupação para a sociedade, pois essas contaminações com substâncias tóxicas podem atingir águas subterrâneas, que estão sendo ou serão usadas como fonte de abastecimento para consumo humano.

Posto isso, é de suma importância a remediação de locais contaminados por hidrocarbonetos orgânicos, especialmente os derivados de petróleo, como o composto BTEX. Assim, se evita grandes danos ao meio ambiente e a população, além de atendimento à legislação ambiental, fator importante para operação do posto.

1.2.OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é propor uma solução de remediação, por meio de técnicas de remediação comprovadamente eficazes, para o posto de abastecimento, que se encontra contaminado por hidrocarbonetos derivados de subprodutos de petróleo.

Para alcançar tal objetivo, o presente trabalho tem o propósito de realizar uma adequada caracterização da área de estudo, com a finalidade de propor a melhor técnica de remediação para o local baseado em suas características, com o intuito de executar um processo de remediação eficiente e evitar novos danos ao meio ambiente e a população. Além disso, esse estudo tem o objetivo de avaliar a possível presença de poluentes derivados de combustíveis no córrego da Ponte, situado próximo ao posto em estudo.

1.3.DESCRICÃO DOS CAPÍTULOS

A seguir será apresentada uma breve descrição dos capítulos do estudo em tela.

- Capítulo 1: apresenta uma introdução e a problemática sobre o assunto que será abordado ao longo do estudo, bem como seus objetivos e justificativas de realização do mesmo.
- Capítulo 2: consiste na revisão bibliográfica. Aborda os mecanismos de transporte dos contaminantes no solo, a toxicidade relacionada ao composto BTEX, o diagnóstico de áreas contaminadas e as técnicas de remediação de *in situ* comprovadamente eficazes, segundo a literatura.
- Capítulo 3: aborda a etapa metodológica do estudo, apresentando os materiais e método realizados para obtenção dos resultados.
- Capítulo 4: apresenta os resultados obtidos. Os resultados estão divididos em resultados da etapa de avaliação preliminar e resultados da etapa de investigação detalhada.
- Capítulo 5: apresenta a proposta de sistema de remediação ambiental para o posto de abastecimento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONTAMINAÇÃO POR DERIVADOS DE HIDROCARBONETOS

Os produtos derivados de petróleo quando em contato com a subsuperfície podem se distribuir em quatro fases: vapor, residual, dissolvida e livre. A fase livre é a porção de hidrocarbonetos não miscíveis em água que fica alojada sobre o topo do aquífero livre; a fase de vapor é quando o contaminante está difuso no ar intersticial do solo; a fase em que o contaminante está preso por capilaridade ou sorvido nas partículas de solo é chamada de fase residual; e a fase dissolvida ocorre quando o poluente encontra-se dissolvido na umidade da zona vadosa ou na água subterrânea.

Os mecanismos de transporte de contaminantes são os processos pelos quais as substâncias se movimentam na matriz de solo. São quatro os principais mecanismos de transporte de hidrocarbonetos no solo: advecção; adsorção; difusão e dispersão mecânica. A advecção é o mecanismo na qual a substância é transportada por um fluido em movimento, mantendo-se constante sua concentração. O mecanismo de transporte por adsorção ocorre quando existe uma superfície de contato entre uma partícula sólida e um gás ou líquido e a concentração de determinada substância é maior na superfície da partícula sólida do que no interior desse gás ou líquido. A difusão molecular é o transporte do contaminante de uma região de alta concentração para uma região de baixa concentração. A dispersão mecânica é o transporte do contaminante devido as variações de velocidade nas linhas de fluxo dentro do meio poroso.

2.2. CARCINOGENICIDADE DO BTEX

Quando se fala sobre contaminação por derivados de petróleo como gasolina e o óleo diesel, um grupo de contaminantes possui atenção especial, são os hidrocarbonetos monoaromáticos benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos, chamados coletivamente como composto BTEX. São os constituintes que têm maior solubilidade em água e, portanto, são os contaminantes com maior potencial de poluir o lençol freático. Os BTEX são extremamente tóxicos à saúde humana, apresentando toxicidade crônica mesmo em pequenas concentrações, podendo levar a lesões do sistema nervoso central. O benzeno é reconhecidamente o mais tóxico de todos os BTEX, pois se trata de uma substância comprovadamente carcinogênica, podendo causar leucemia. Uma exposição aguda (altas concentrações em curtos períodos) por inalação ou ingestão pode causar até mesmo a morte de uma pessoa (Brito *et al.*, 2005; Penner, 2000).

A capacidade de provocar danos cromossômicos e à medula óssea do benzeno já foi amplamente demonstrada em humanos e animais, fato observado em trabalhadores expostos ao benzeno que tiveram alterações cromossômicas numéricas e estruturais em linfócitos e células da medula óssea. Na fauna e flora os hidrocarbonetos aromáticos ligam-se as moléculas proteicas e ao tecido adiposo, sendo transferidos através de bioacumulação, contaminando outros seres, trazendo, assim, implicações para a pesca e saúde pública (Tiburtius *et al.*, 2004).

2.3. DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DE ÁREAS CONTAMINADAS

Segundo a norma ABNT 15.515 de 2007, remediação de áreas contaminadas é a aplicação de técnica ou conjunto de técnicas em uma área comprovadamente contaminada, visando a remoção, contenção ou redução das concentrações dos contaminantes presentes, de modo a assegurar a reabilitação da área, com limites aceitáveis de riscos à saúde humana e ao meio ambiente para o uso declarado.

Entretanto, anterior ao processo de remediação é realizada a avaliação do passivo ambiental, contemplando o diagnóstico ambiental da área. O diagnóstico ambiental objetiva caracterizar o meio físico a ser remediado. Essa caracterização se baseia no levantamento de dados sobre o local, podendo ser coletados dados, por exemplo, geológicos, hidrológicos e pedológicos.

A avaliação do passivo ambiental é realizada em três etapas: avaliação preliminar; avaliação investigatória e investigação detalhada. A avaliação preliminar identifica a possível existência de contaminação na área, isso ocorre por meio de estudos histórico e estudos sobre o meio físico. A realização de avaliação preliminar é pré-requisito para a realização das etapas subsequentes da avaliação de passivo ambiental. Havendo indícios na avaliação preliminar, realiza-se a etapa de investigação confirmatória, essa etapa tem como objetivo principal confirmar ou não a existência de substâncias de origem antrópica nas áreas suspeitas, no solo ou nas águas subterrâneas, em concentrações acima dos valores de investigação. Confirmada a contaminação, a próxima etapa é a investigação detalhada, essa etapa consiste na aquisição e interpretação de dados da área contaminada, a fim de entender a dinâmica da contaminação nos meios físicos (ABNT, 2007).

Nos casos em que a contaminação é comprovada na etapa de avaliação preliminar, direciona-se para a etapa de investigação detalhada, não havendo necessidade de investigação

confirmatória já que a contaminação já foi comprovada. As etapas da avaliação de passivo ambiental são apresentadas no fluxograma a seguir (Figura 2.1).

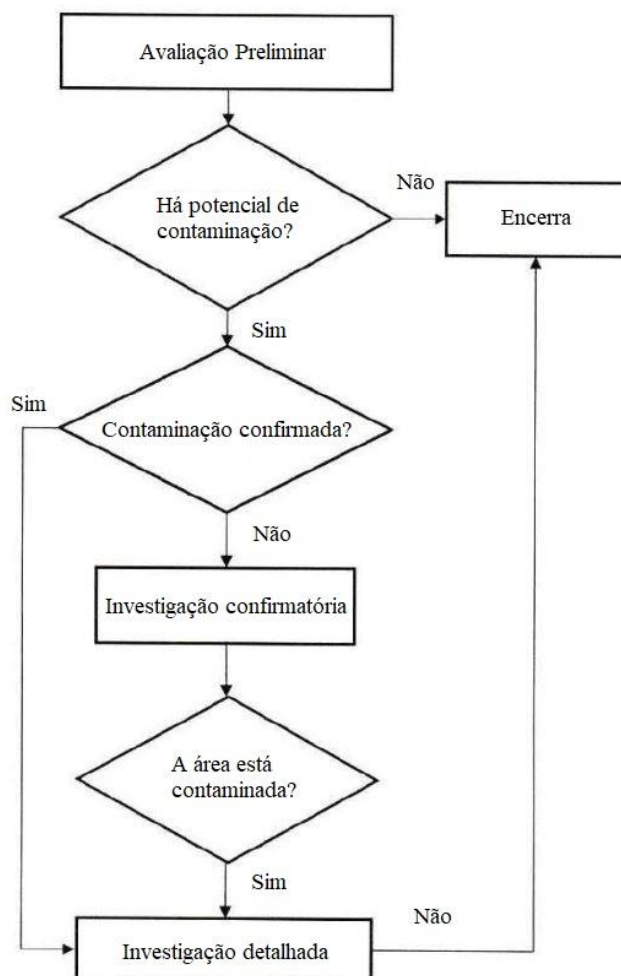


Figura 2.1. Fluxograma das etapas de avaliação de passivo ambiental (ABNT, 2007)

As etapas descritas anteriormente são baseadas em valores orientadores. Para solo e água subterrânea, a legislação que fornece tais valores é a resolução CONAMA nº 420 de 2009 que dispõe sobre valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias.

Os valores orientadores retratados pela resolução para águas subterrâneas dizem respeito aos valores de investigação, que é a concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, ou seja, amostras de água subterrânea em desacordo com esta resolução apresentam forte risco à população local e ao meio ambiente. Tal resolução será a bibliografia norteadora quanto a valores de referência de qualidade de remediação para águas subterrâneas.

2.4. TÉCNICAS DE REMEDIAÇÃO *IN SITU* PARA CONTAMINAÇÕES PROVOCADAS POR COMBUSTÍVEIS

A descontaminação de áreas contaminadas por hidrocarbonetos ocorre por meio do emprego de técnicas de remediação, estas que podem ser *in situ* ou *ex situ*. As técnicas *in situ* são aplicadas no próprio local contaminado e as técnicas *ex situ* são realizadas fora da área poluída, necessitando extração do solo contaminado e seu transporte até o local de tratamento.

De acordo com Furtado (2008), a tendência na aplicação de tecnologias de remediação em áreas contaminadas é resolver os problemas de forma *in situ*, em oposição às tecnologias *ex situ*, que podem ser desde a simples remoção do solo para destruição ou da água para tratamento até o uso de biopilhas, onde se removem e empilham solos contaminados, misturados com matérias orgânicas, instalando-se tubulações para aeração e injetando nutrientes para incentivar a biodegradação. Para Santos *et al.* (2008), nos meios técnicos, é inquestionável que a melhor opção tecnológica tanto em custo, como em eficiência, será sempre a remediação *in situ*. Destaca-se que o processo de remediação *in situ* causa menor perturbação ao meio ambiente, devido a não necessidade de escavação de solo.

O uso futuro do local contaminado após sua remediação será a continuidade dos serviços prestados atualmente, incluindo o abastecimento de veículos automotivos e pequenos serviços de manutenção desses veículos. Dito isso, as técnicas de remediação *in situ* se mostram mais vantajosas perante as técnicas *ex situ*, principalmente por oferecer menor intervenção nas atividades do Posto.

Com base em FRTR (2002) - conjunto de órgãos estadunidenses relacionados com tecnologia e meio ambiente, incluindo a NASA e a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) – foram selecionadas técnicas de remediação *in situ* comprovadamente eficazes no tratamento de áreas contaminadas por derivados de petróleo. A FRTR (2002) aponta como técnicas *in situ* que se destacam perante as demais na remediação de locais contaminados por combustíveis fósseis as técnicas: *air sparging*; atenuação natural monitorada; biorremediação; *bioventing*; extração multifásica; extração de vapor do solo e tratamento térmico. Tais técnicas de remediação serão retratadas nos tópicos seguintes.

2.4.1. *Air Sparging*

A técnica de remediação de solos *air sparging* consiste no bombeamento de ar comprimido a pressão e vazão controladas na zona saturada do solo (aquífero) geralmente abaixo da zona

contaminada. A injeção de ar causa um borbulhamento na água criando uma aeração que acarreta na volatilização dos Compostos Orgânicos Voláteis (COV).

Tal volatilização causa o desprendimento dos contaminantes da água subterrânea, estes que agora ficam livres para ser captados na região imediatamente acima, na zona insaturada do solo (Tavares, 2013). A Figura 2.2 exemplifica o funcionamento da técnica.

Tavares (2013) explica que esta técnica não só remove COV como também CHC, BTEX (Benzeno, Tolueno, Etil-benzeno e Xileno) e PAH (Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos), compostos presentes em derivados de petróleo e conhecidos por serem tóxicos aos seres vivos. É uma técnica *in situ* de remediação de solos contaminados.

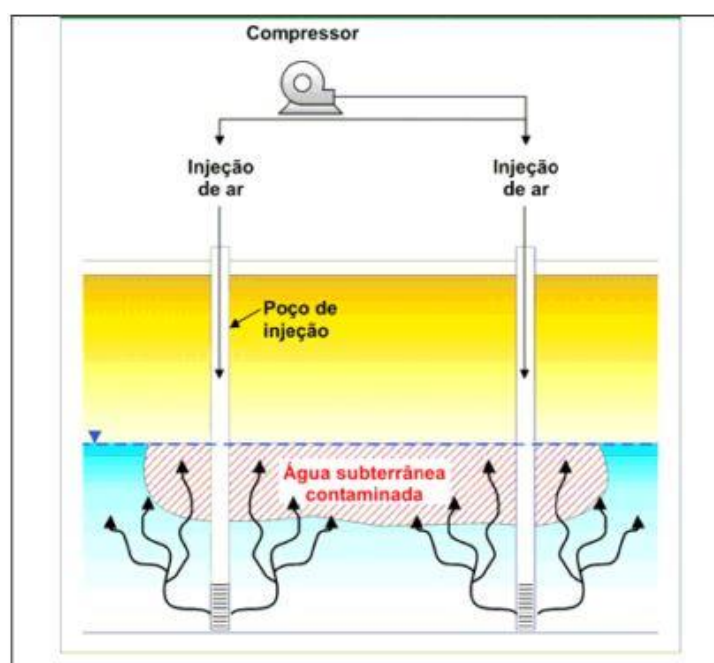


Figura 2.2. Esquema de funcionamento da técnica Air Sparging (Bechara, 2004).

Usualmente, esta técnica é utilizada em conjunto com outras técnicas como a Extração de Vapor do Solo. A técnica *air sparging* deve ser utilizada em conjunto com a técnica de extração de vapor do solo (EVS) (Nobre *et al.*, 2003; Tiburtius *et al.*, 2004). Isto porque enquanto o método *air sparging* transforma o contaminante na forma gasosa a EVS retira este vapor da subsuperfície, atuando na zona não saturada do solo.

Este método também está relacionado com a tecnologia de remediação *biosparging* já que a injeção de ar no solo estimula a atividade aeróbia dos microrganismos. “O *air sparging* pode ser muito efetivo em providenciar oxigênio para microrganismos aeróbios. Estes microrganismos são naturalmente encontrados nas áreas contaminadas e são frequentemente

capazes de oxidar uma ampla gama de compostos orgânicos, incluindo compostos semivoláteis, que não são removidos por volatilização” (Mariano, 2006).

Alguns fatores podem comprometer a aplicabilidade e a eficiência do método, tais como: a profundidade da contaminação e do nível d'água local; tipos litológicos pouco permeáveis que impossibilitem a subida dos gases; a injeção de ar deve ser projetada para condições específicas e o fluxo de ar através da zona não saturada pode não ser uniforme, reduzindo o desempenho da técnica (Coutinho & Gomes, 2014).

A espessura saturada e a profundidade do lençol freático devem ser fatores controladores da injeção de ar para que não ocorra o extravasamento do contaminante para fora da área de tratamento, já que a injeção de ar abaixo do nível d'água pode causar uma elevação da superfície da água subterrânea (Tavares, 2013).

Segundo Coutinho & Gomes (2014), as principais características que determinam a eficiência do método são: a permeabilidade gasosa na zona não saturada, a taxa de fluxo de água, a permeabilidade do aquífero, a volatilidade do contaminante e a sua solubilidade.

A simplicidade de projeto; tecnologia de baixo custo de implementação; equipamento de fácil instalação; não há geração de resíduos que requerem tratamento (o vapor gerado vai direto para a atmosfera) e a técnica ser eficaz na contenção da pluma de contaminantes, atuando diretamente no foco de contaminação, são algumas das vantagens que tornam a técnica de *air sparging* atrativa (Papadopoulos & Vatseris, 2005).

Conforme cita Papadopoulos & Vatseris (2005), algumas limitações desse método são: baixa eficiência de remoção em contaminantes que possuem baixa biodegradabilidade aeróbica; condições geológicas desfavoráveis impedem um fluxo de ar uniforme através do solo; fluxo de ar eficaz em uma área definida, para áreas maiores é necessário uma maior quantidade de poços para obter-se um fluxo de ar adequado através da região contaminada.

Conclui-se que o método de remediação *air sparging* pode ser muito eficaz na remediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados se complementado com alguma outra técnica, EVS e *bioventing*, por exemplo. Fatores como simplicidade de projeto e o baixo custo de execução tornam a técnica uma das mais utilizadas no mundo.

2.4.2. Atenuação Natural Monitorada

O método de tratamento atenuação natural é um método de remediação *in situ* (no local contaminado) que utiliza processos naturais na contenção da pluma de contaminação e na redução das concentrações dos contaminantes em locais contaminados (EPA, 1996).

É uma forma de remediação passiva do solo que envolve a ocorrência de processos biológicos, físicos e químicos, como biodegradação, volatilização, dispersão, diluição e adsorção. Esses processos são classificados em destrutivos e não destrutivos. Os processos destrutivos, como a biodegradação e a hidrólise, são caracterizados pela destruição física do contaminante orgânico. Já os processos não destrutivos são reconhecidos por apenas transportar o contaminante e/ou reduzir suas concentrações no meio (diluição e dispersão, por exemplo).

Em locais contaminados por petróleo e seus derivados, a biodegradação é o processo mais importante (e desejável) da atenuação natural, uma vez que é o único processo natural que resulta na redução real da massa dos contaminantes de petróleo (EPA, 2017). Cabe ressaltar que somente a biodegradação destrói fisicamente os contaminantes. Os demais processos, basicamente, transferem os contaminantes de um local para outro ou os retêm.

Em condições favoráveis essa técnica promove a redução da massa, da toxicidade, da mobilidade, do volume e da concentração dos contaminantes presentes no solo e no lençol freático. Para isso, é preciso realizar um rigoroso monitoramento da área contaminada para avaliar o nível de contaminação do solo, verificando o desempenho da técnica.

A atenuação natural não se trata de “não fazer nada” ou “não agir” na área impactada, mas sim avaliar (através de ensaios laboratoriais) a capacidade natural do solo de degradar o contaminante orgânico. Por ser uma técnica que depende do comportamento natural do solo a técnica possui uma cinética de degradação muito lenta e requer longos períodos de monitoramento.

A principal vantagem do processo de atenuação natural é que, mesmo sem o acréscimo de nutrientes no solo ou a adequação de qualquer condição ambiental, a redução do contaminante pode acontecer de maneira eficiente e contínua. Isso ocorre devido, principalmente, ao processo de adaptação natural da microbiota nativa existente no solo impactado (Robb & Moyer, 2001).

Nos Estados Unidos a atenuação natural é comumente empregada em contaminações originadas por vazamentos de derivados de petróleo em tanques de combustível com armazenamento subterrâneo (EPA, 1996).

Andrade *et al.* (2010) traz que a técnica de atenuação natural monitorada não é recomendada como técnica principal na remediação de áreas contaminadas, isto por que as condições do meio, o tipo e a concentração dos contaminantes podem não contribuir para a redução de substâncias tóxicas e recalcitrantes, aumentando os riscos de contaminação de pessoas e animais. Por isso, recomenda-se a utilização da atenuação natural associada a alguma outra técnica de remediação.

2.4.3. Biorremediação

A biorremediação é uma técnica aonde microrganismos, nativos ou inseridos no solo, degradam bioquimicamente a fração orgânica presente no contaminante. Este processo geralmente ocorre com a utilização de fungos filamentosos, leveduras ou bactérias, sendo esta última a mais empregada (Andrade *et al.*, 2010).

As bactérias são microrganismos unicelulares, que se desenvolvem na forma de colônias e vivem em diferentes nichos ambientais. As bactérias são consideradas o elemento principal da biodegradação de contaminantes nos solos e em águas subterrâneas. Sua importância deve-se, principalmente, a seus efeitos bioquímicos e por transformarem ou destruírem os contaminantes potencialmente perigosos em compostos menos danosos ao ser humano e ao meio ambiente (NRC, 1993).

Leahy e Colwell (1990) citam em seu estudo os principais gêneros de bactérias degradadoras de hidrocarbonetos, são estes: *Achromobacter*, *Acinetobacter*, *Alcaligenes*, *Arthobacter*, *Bacillus*, *Flavobacterium*, *Nocardia* e *Pseudomonas*.

Nos países da Europa, no Canadá e nos Estados Unidos, a técnica de biorremediação tem sido bastante utilizada no tratamento de solos contaminados por derivados de hidrocarbonetos de petróleo (Andrade *et al.*, 2010). Para Bento *et al.* (2003), a técnica de biorremediação tem se destacado como uma alternativa viável e promissora no tratamento de solos contaminados por petróleo e seus derivados.

A Figura 2.3 ilustra o processo realizado pelos microrganismos de decomposição do contaminante. Os microrganismos obtêm nutrientes e energia das substâncias orgânicas, os

mesmos digerem essas substâncias presentes em solos e águas subterrâneas, transformando-as, principalmente, em dióxido de carbono e água. Deve-se ter um cuidado com esse tipo de remediação, pois os microrganismos podem gerar substâncias mais tóxicas, tanto para o homem como para o meio ambiente (Coutinho & Gomes, 2014).

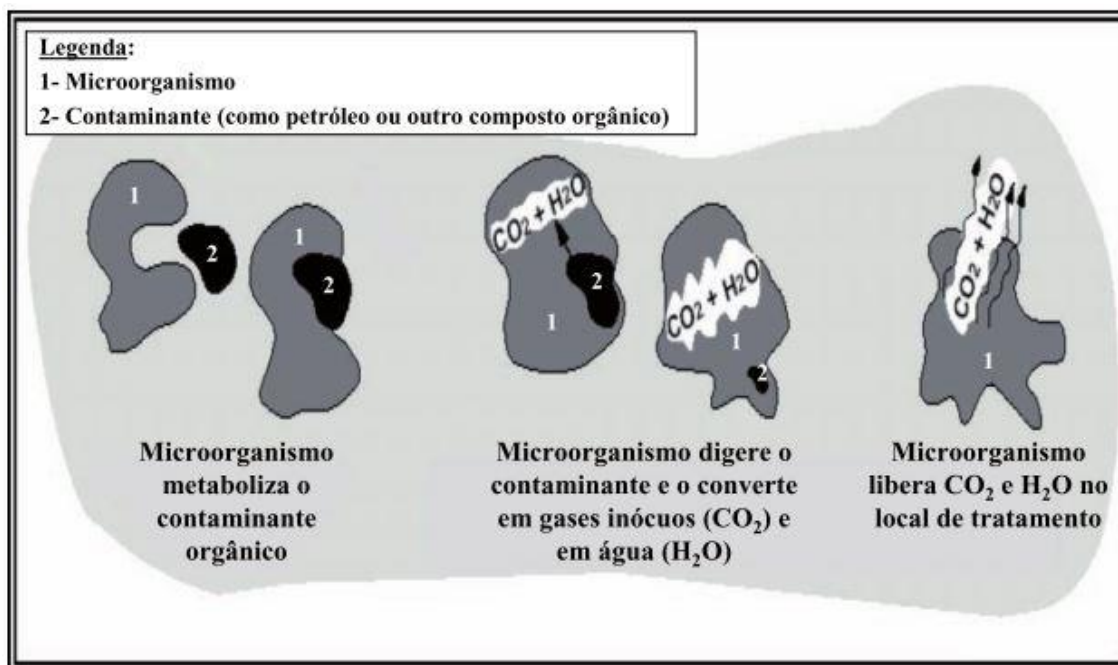


Figura 2.3. Processo de decomposição do contaminante pela ação dos microrganismos (modificado – EPA, 1996).

A técnica de biorremediação pode ser realizada de duas formas: *in-situ* (no próprio local aonde ocorreu a contaminação) e *ex-situ* (fora do local contaminado, ocorre a remoção do solo contaminado). No método *ex-situ* é possível ter um maior controle e um melhor acompanhamento das condicionantes do meio, em contrapartida o processo de remediação com remoção de solo possui um custo superior se comparado ao processo *in-situ*. Além da maior viabilidade econômica, a técnica *in-situ* possui a vantagem de proporcionar um menor impacto ambiental na área contaminada, já que não ocorre a remoção de solo.

Quando se fala em contaminação por petróleo, uma grande preocupação diz respeito aos contaminantes tóxicos nele presente, nesse aspecto se destacam os hidrocarbonetos monoaromáticos que formam o grupo BTEX - benzeno, tolueno, etil-benzeno e xileno – sendo o benzeno o mais tóxico. Estes são os principais compostos tóxicos presentes nos derivados de petróleo, como a gasolina. Estes contaminantes tóxicos possuem um elevado poder nocivo aos seres humanos, estando associados a efeitos danosos ao sistema nervoso central e a doenças como o câncer. Andrade *et al.* (2010) cita em seu artigo que a técnica de

biorremediação possui eficiência comprovada na degradação de compostos tóxicos aos seres humanos.

Segundo Andrade *et al.* (2010), nas áreas contaminadas por petróleo e seus derivados existem outras classes de compostos além dos BTEX que merecem atenção, como é o caso dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA), os hidrocarbonetos totais de petróleo (HTP) e os compostos orgânicos voláteis (COV) totais. O mesmo autor explica que em caso de poluição no solo, os compostos BTEX, HPA e HTP são escolhidos para monitoramento, principalmente, por sua toxicidade, mobilidade e persistência no meio; e os COV totais, por representarem o total de emissão gasosa, como perdas por volatilização provenientes do derramamento.

A capacidade dos microrganismos de biodegradar poluentes orgânicos está diretamente associada à estrutura química desses poluentes, compostos orgânicos de cadeia mais simples - como hidrocarbonetos com baixo peso molecular e álcoois - são rapidamente degradados, enquanto outros compostos orgânicos não são biodegradáveis (compostos recalcitrantes). Compostos xenobióticos (compostos químicos fabricados pelo homem), especialmente hidrocarbonetos halogenados, tendem a ser mais resistentes à biodegradação (Mariano, 2006).

Outros fatores que interferem diretamente na capacidade de biodegradação dos microrganismos são: pH e temperatura. As Figuras 2.3 e 2.4 demonstram o comportamento bacteriano com a variação de temperatura e pH. Pode-se observar na Figura 2.4 que a atividade biológica é maior dentro da faixa de pH entre 6,5 e 8,5, tendo nível ótimo próximo de 7. A partir da Figura 2.5 pode-se constatar que a faixa de temperatura ideal para degradação dos microrganismos está entre 25 e 30 graus Celsius, já que nesta faixa ocorre maior respiração bacteriana, elevadas taxas de respiração estão diretamente associadas a uma elevada atividade microbiana.

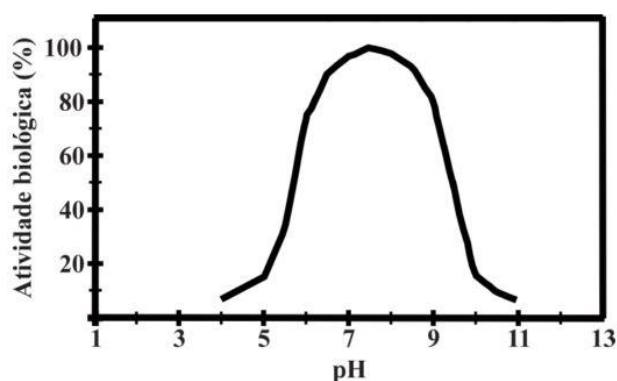


Figura 2.4. Variação da atividade biológica com a variação do pH (Tate, 1995).

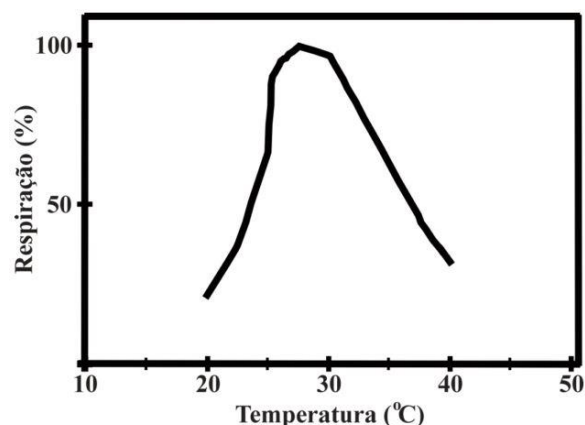


Figura 2.5. Variação da atividade respiratória dos microrganismos com a variação de temperatura (Tate, 1995).

A depender do tipo de contaminante no solo, a técnica de biorremediação não é indicada, como no caso de compostos com baixa solubilidade em água. Compostos com características hidrofóbicas (como óleos e o próprio petróleo) tendem a adsorver nas partículas de solo dificultando a ação dos microrganismos. Neste tipo de cenário recomenda-se a utilização de surfactantes. Segundo Ou (2000) a utilização de surfactantes em solos contaminados com hidrocarbonetos de petróleo eleva a eficiência do processo de biorremediação, tendo em vista que estes compostos reduzem a tensão superficial, aumentando a solubilidade dos contaminantes.

A técnica de biorremediação também se mostra ineficiente em solos argilosos, já que estes apresentam um baixo índice de permeabilidade comprometendo o fluxo de ar entre as camadas do solo, dificultando o incremento de oxigênio para o processo aeróbio, e a incorporação de nutrientes favoráveis ao processo metabólico dos microrganismos.

Segundo Andrade *et al.* (2010), pesquisas revelam que a aplicação desta técnica no Brasil é bastante favorável, isto se deve principalmente aos fatores ambientais, tais como: os teores de umidade e oxigênio; disponibilidade de nutrientes no solo e as condições climáticas do Brasil.

Conclui-se que a técnica de biorremediação é uma técnica bastante atrativa na remediação de solos contaminados por hidrocarbonetos, principalmente pelo seu baixo custo e simplicidade de projeto. Fatores como tempo disponível para remediação e as características intrínsecas do solo podem reduzir o interesse pela técnica.

2.4.4. Bioventing

Bioventing é uma técnica *in situ* de remediação de solos que consiste na injeção de ar na zona vadosa do solo (zona não saturada) objetivando intensificar o metabolismo microbiano aeróbio, acelerando o processo de biodegradação de hidrocarbonetos de petróleo no solo. Se necessário, nutrientes também podem ser inseridos no solo.

A estrutura requerida pelo método é muito similar a estrutura da técnica extração de vapor do solo no que diz respeito a necessidade de poços escavados e de uma bomba de ar. Entretanto, enquanto a técnica EVS remove compostos voláteis através da formação de vácuo, no *bioventing* ocorre a injeção de ar, ou oxigênio, no solo para promover a biodegradação. Não visando a volatilização do contaminante, no *bioventing* a injeção de ar ocorre em baixas taxas de aplicação, o suficiente para incentivar a atividade microbiana (EPA, 1994).

Segundo Mindrisz (2006), o método de injeção de ar na zona vadosa tem sido empregado com sucesso na remediação de solos contaminados por hidrocarbonetos de petróleo, pesticidas, preservativos de madeira, solventes clorados e outros orgânicos químicos. A agência de proteção ambiental dos Estados Unidos (1994) afirma que a tecnologia é comprovadamente eficiente na degradação de derivados de petróleo com médio peso molecular, como querosene e diesel. Compostos com baixo peso molecular tendem a volatilizar rapidamente e compostos com alto peso molecular - como óleo lubrificante – propendem a ter uma baixa cinética de biodegradação.

Quando o contaminante está presente tanto na zona vadosa quanto na zona saturada do solo, a técnica *bioventing* frequentemente tem sido aplicada em conjunto com a técnica *biosparging* para obtenção de melhores resultados de descontaminação (EPA, 1994a). A Figura 2.6 exemplifica o emprego de ambas as técnicas em conjunto.

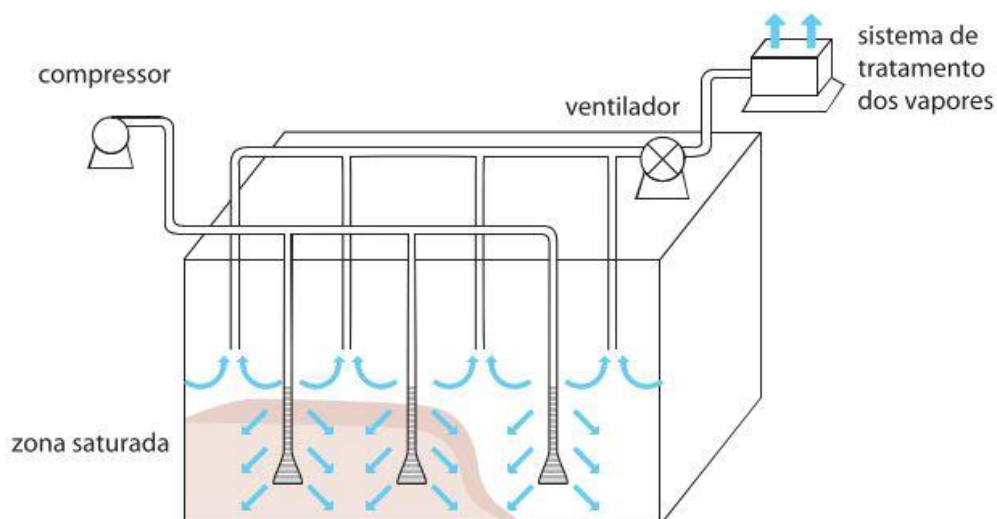


Figura 2.6. Esquemática da aplicação conjunta das técnicas biosparging e *bioventing*, sendo biosparging à esquerda e *bioventing* à direita (modificado – EPA, 1994).

A aplicação da técnica não é recomendada para solos que possuem baixa permeabilidade e altos níveis de argila, pois a infiltração do ar pode ser prejudicada. A Tabela 2.1 apresenta algumas vantagens e desvantagens do método em tela.

Tabela 2.1 Vantagens e desvantagens do método biosparging (EPA, 1994).

Vantagens	Desvantagens
Por ser um método <i>in situ</i> cria pouca perturbação no solo e pode ser aplicado embaixo de edificações.	Concentrações elevadas de contaminantes podem ser tóxicas aos microrganismos.
Equipamentos de fácil instalação.	Não aplicável em certas condições de solo.
Requer pouco tempo de tratamento (6 a 24 meses).	Não garante alta eficiência de remediação.
Custo do método competitivo.	Pode exigir a injeção de nutrientes.
Facilmente combinável com outras técnicas.	
O tratamento dos gases pode não ser preciso.	

2.4.5. Extração Multifásica (MPE)

A técnica de extração multifásica combina às técnicas de bioventilação e extração de vapor do solo, possibilitando a remoção do contaminante da fase livre, fase de vapor e fase dissolvida na matriz do solo, essa é uma das principais vantagens do método.

A extração multifásica está se tornando uma tecnologia cada vez mais comum em locais contaminados por petróleo e seus derivados, isto por que a técnica é eficiente na remoção da

fonte de contaminação mesmo em solos com baixa permeabilidade e pode ser aplicada tanto na zona vadosa quanto na zona saturada (EPA, 1999).

A técnica consiste na instalação de poços, na área contaminada, ligados a uma bomba de vácuo. A aplicação de vácuo no solo contaminado proporciona a volatilização e transporte dos contaminantes voláteis para a superfície para posterior tratamento. O vácuo aplicado também aumenta o gradiente hidráulico no lençol freático, fornecendo a recuperação das águas subterrâneas, não só removendo os contaminantes dissolvidos como também impedindo o avanço da pluma de contaminação (Baldwin *et al.*, 2008).

O efluente contaminado é bombeado dos poços de extração e encaminhado para o tanque de vácuo onde se dará a separação das fases líquida e gasosa. Os gases contendo compostos orgânicos voláteis (COV) serão direcionados, através de um compressor, para o tratamento e redução de suas concentrações em um filtro de carvão ativado. O ar, após tratamento será emitido à atmosfera através de uma tubulação localizada acima do sistema de tratamento (Baldwin *et al.*, 2008).

A água contendo hidrocarbonetos em fase livre e dissolvida será direcionada a um sistema de separação e filtragem. Os hidrocarbonetos em fase livre captados após o processo de separação serão armazenados em tambores, visando à destinação adequada; a água com hidrocarbonetos em fase dissolvida será encaminhada ao filtro de carvão ativado, que irá promover a redução das concentrações dos compostos de interesse. Ao final do processo a água tratada será descartada na caixa separadora de água e óleo ou em poços de injeção (EPA, 1999).

A ventilação no solo gerada pela aplicação do vácuo proporciona um incremento de oxigênio no solo potencializando o processo de biorremediação, processo conhecido como bioventilação. A Tabela 2.2 apresenta as principais vantagens e desvantagens do sistema MPE.

Tabela 2.2 Vantagens e desvantagens da técnica de remediação extração multifásica (MPE) (modificado – EPA, 1999).

Vantagens	Desvantagens
Potencial biodegradação aeróbia de BTEX dissolvidos.	Requer bomba de vácuo.
Eficaz em solos de moderada a baixa permeabilidade	Maiores custos se comparado a outras técnicas de bombeamento.
Eficaz para remediação simultânea de fase dissolvida, vapor, residual e não aquoso.	Em caso de contaminações muito profundas a técnica torna-se muito onerosa.
Grande raio de influência e aumento da zona de captura.	
Menor tempo de reparo dos danos em comparação com métodos convencionais de bombeamento.	

2.4.6. Extração de Vapor do Solo (EVS)

A técnica de remediação extração de vapor do solo é um método *in situ* também conhecido como soil venting e extração a vácuo. Essa técnica visa a redução de compostos orgânicos voláteis (COV) presentes nas contaminações por petróleo que ficam adsorvidos nas partículas de solo na zona não saturada (zona vadosa) (EPA, 1994b).

O método consiste na aplicação de vácuo no solo visando a criação de um gradiente de pressão negativa, esse gradiente induz o fluxo de vapor em direção aos poços de extração. A depender do tipo de gás coletado, este deve ser tratado e, posteriormente, lançado na atmosfera (EPA, 1994b). A depender do formato das plumas e desejando aumentar a segurança, podem ser construídos tanto poços verticais quanto poços horizontais. Extrações verticais são utilizadas em profundidades que variam de 1,5 a 90 m.

Usualmente, essa técnica é utilizada em conjunto com a tecnologia *air sparging* tendo a vantagem de que seus efluentes gasosos podem ser tratados em uma mesma unidade de tratamento. A Figura 2.7 demonstra a técnica de remediação EVS em conjunto com a técnica *air sparging*.

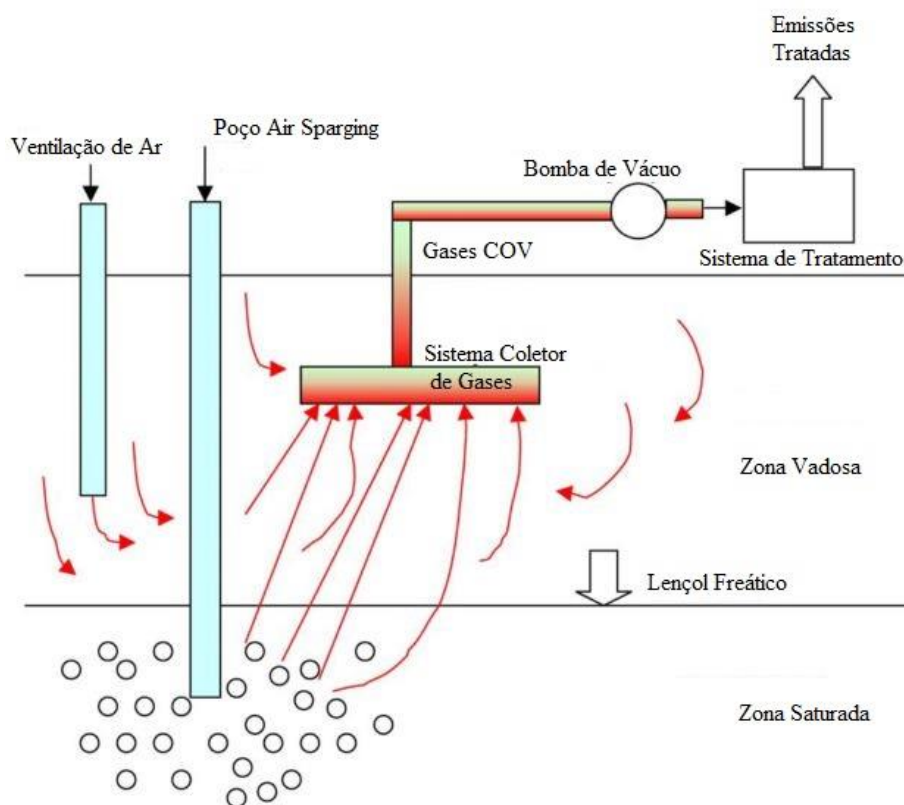


Figura 2.7. Ilustração da técnica de extração de vapor do solo em conjunto com a técnica *air sparging* (modificado - Khan *et al.*, 2004).

O método EVS também favorece a biorremediação, já que a circulação de ar criada no solo impulsiona a atividade aeróbia dos microrganismos, ocorrendo então, a biodegradação de alguns contaminantes (Maximiano & Moraes, 2014). Segundo Tavares (2013), a eficiência da técnica EVS pode aumentar se esta for combinada com alguma técnica de injeção de ar, pois o ar injetado força a saída da água dos poros do solo promovendo uma dessorção do contaminante da estrutura do solo.

Alguns fatores interferem diretamente na aplicabilidade da técnica, são estes: a permeabilidade do solo e a volatilidade do composto. No que se refere à volatilidade do poluente orgânico, a tecnologia é aplicada somente para compostos voláteis que apresentam o valor da constante de Henry acima de 0,01 ou pressão de vapor maior que 0,5 mm de Hg. Quanto à permeabilidade do solo, a extração de vapores do solo não deve ser utilizada em solos densos (solos de baixa permeabilidade), pois é necessário que ocorra uma ventilação eficiente nos poros. Fatores como umidade e a quantidade de matéria orgânica afetam diretamente a permeabilidade do solo e, conseqüentemente, afetam a eficiência do sistema de extração. A técnica extração de vapores do solo deve ser utilizada em solos com valores de

permeabilidade superiores a 10^{-7} cm/s (Frank & Barkley, 1995; Andrade *et al.*, 2010; Abdanur, 2005; Ackermanm, 2004).

Pode-se concluir que a técnica extração de vapor do solo é um método eficiente de remediação de contaminantes de petróleo (e seus derivados) presentes na zona vadosa do solo, principalmente se aplicada em conjunto com outra técnica. Sua principal desvantagem diz respeito a destruição do contaminante, por se caracterizar em ser um processo puramente físico, a técnica não garante a destruição do mesmo, porém, o sistema de tratamento de gases *on site* (no próprio local) completa a técnica assumindo essa função. A Tabela 2.3 apresenta as vantagens e as desvantagens do método.

Tabela 2.3 Vantagens e desvantagens do método extração de vapores do solo (EVS) (EPA, 1994b).

Vantagens	Desvantagens
O desempenho comprovado da técnica.	Dificuldade em alcançar redução de concentração acima de 90%.
Por ser uma técnica <i>in situ</i> oferece mínimo distúrbio ao local.	Baixa eficiência quando aplicada em solos de baixa permeabilidade ou solos estratificados.
Tempos curtos de tratamento (de 6 a 24 meses).	Necessidade de tratamento dos gases para disposição na atmosfera.
Facilidade de combinação com outras técnicas (air sparging e biorremediação, por exemplo).	Requere licença para emissão de gases.
Pode ser aplicada embaixo de construções e em locais aonde não é possível escavar o solo.	Aplicável somente a zona não saturada.

2.4.7. Tratamento Térmico

O tratamento térmico *in situ* objetiva a remoção de contaminantes do solo e de águas subterrâneas contaminadas através da injeção de calor no local. O calor evapora o contaminante e a água presente no solo transformando-os em gases, esses gases, também chamados de vapores, podem se mover facilmente através do solo. Os contaminantes, agora na forma de gás, se movem através do solo e das águas subterrâneas em direção aos poços de extração, onde são coletados e canalizados para a superfície do solo onde será tratado. Durante a aplicação a injeção de calor, alguns poluentes são destruídos no interior do solo durante o processo de aquecimento. (EPA, 2012).

Um dos mecanismos de aquecimento do solo é por meio de uma corrente elétrica induzida a passar através da área contaminada. Hastes de metal chamadas de eletrodos são inseridas no solo e fornecem uma corrente elétrica, a corrente gera calor que aquece a água e o contaminante presentes no solo, vaporizando-os. Os poços de coleta de vapores, além de coletarem os gases, os direcionam para o local de tratamento dos mesmos. A Figura 2.8 exemplifica a aplicação da técnica.

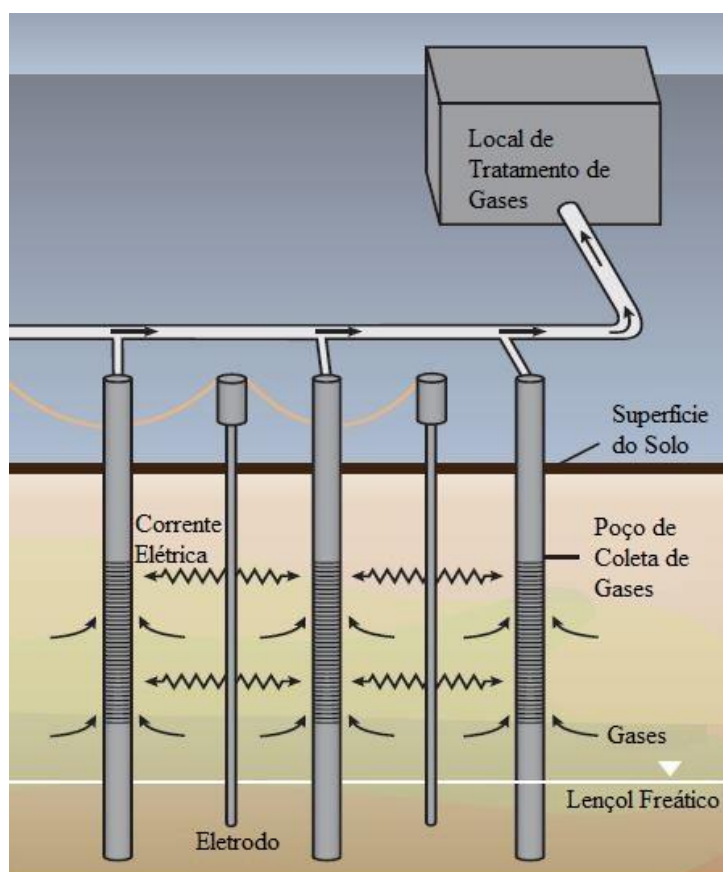


Figura 2.8. Sistema de tratamento térmico com tratamento de gases *in loco* (modificado - EPA, 2012).

O tempo de remediação do local contaminado pode variar de poucos meses a alguns anos, dependendo de condições como: a concentração de contaminantes no solo; a profundidade que o contaminante se encontra; a variedade de solos presentes no local; e se o solo possui uma grande quantidade de matéria orgânica, o que pode retardar o processo de vaporização dos contaminantes (EPA, 2012).

3. METODOLOGIA

A escolha da melhor técnica de remediação para determinada área contaminada depende de uma série de fatores, como por exemplo: as características do contaminante e suas concentrações; a profundidade do contaminante; área superficial disponível para instalação de equipamentos para tratamento; características geotécnicas da matriz de solo; o tipo de solo. Conhecendo essas especificidades e o comportamento do contaminante no solo é possível escolher a melhor técnica de acordo com as características específicas da área em análise. Assim, todo o processo de remediação se dará de forma mais eficiente.

A metodologia proposta visa agregar o máximo de informações sobre o local contaminado, servindo de insumo para escolha do melhor conjunto de técnicas de remediação para o posto de abastecimento. A implantação de um sistema de remediação ambiental no Posto visa à redução das concentrações dos contaminantes presentes no solo e na zona saturada, para assim atender os valores de investigação exigidos pela resolução CONAMA nº 420 de 2009, adequando-se à legislação ambiental.

A Figura 3.1 apresenta o fluxograma da metodologia realizada para sugestão da melhor técnica de remediação *in situ* para o posto de combustível em estudo. Tal proposta de remediação se fundamentou a partir do levantamento de informações a respeito do local contaminado, objetivando conhecer melhor a área de estudo, bem como da revisão bibliográfica apresentada. A sugestão de sistema de remediação ambiental também se baseou no ponto de vista da viabilidade de aplicação da técnica, sem avaliar os critérios de custo de aplicação e remediação. Em seguida, serão apresentados os materiais e métodos que foram realizados para aquisição de tais informações. Esses dados serviram de insumo no processo de tomada de decisão de escolha da tecnologia a ser empregada na área contaminada.

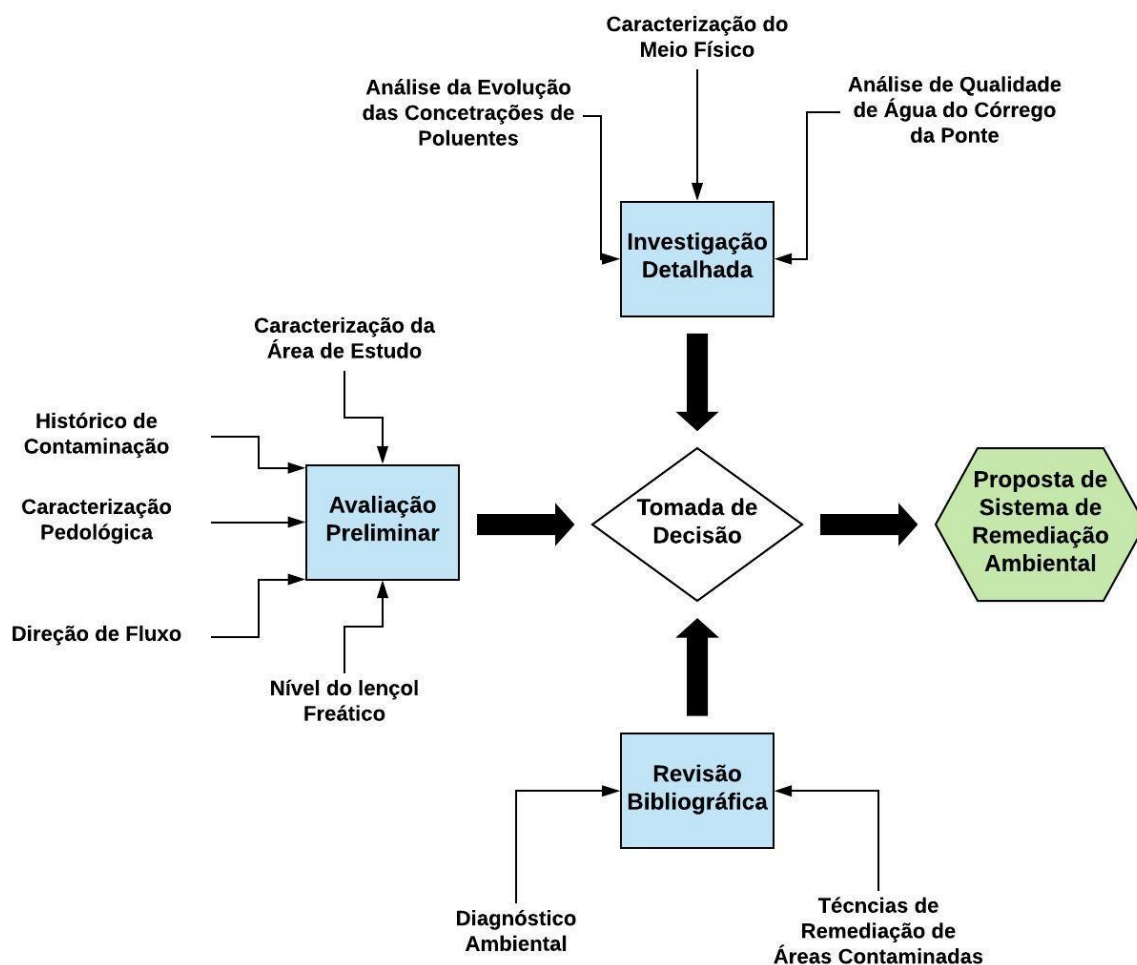


Figura 3.1. Fluxograma representativo da metodologia para escolha de sistema de remediação ambiental.

Durante a etapa de avaliação preliminar foram levantados dados relacionados com o histórico de contaminação do Posto, com o solo do local, com a direção de fluxo da região, com o nível do lençol freático e ainda uma caracterização da área de estudo. Para levantamento de dados a respeito do histórico de contaminação, foi solicitado ao Instituto Brasília Ambiental (IBRAM), órgão executor de políticas públicas ambientais e de recursos hídricos do Distrito Federal, todos os estudos ambientais realizados no posto em estudo. Esse procedimento realizado via Sistema Eletrônico do Serviço de Informação ao Cidadão (e-SIC) do Distrito Federal, no endereço eletrônico: www.e-sic.df.gov.br/Sistema. As informações foram disponibilizadas pelo órgão em formato de mídia digital.

As informações referentes ao lençol freático e à caracterização da área de estudo também foram retiradas dos estudos ambientais disponibilizados, com exceção do mapa de localização, que foi elaborado a partir da base de dados da SEGETH em conjunto com o

software ArcGIS. A caracterização pedológica do local foi desenvolvida apoiada na literatura e o mapa temático de solos da região também foi elaborado em ambiente ArcGIS.

A direção de fluxo de água da área em estudo foi obtida por meio da interação de informações do relevo, como cotas altimétricas, e a utilização de uma ferramenta SIG (Sistema de Informações Geográficas). As informações de relevo são representadas por uma estrutura numérica de dados correspondente à distribuição espacial da altitude e da superfície do terreno, denominada modelo digital de elevação (MDE).

O MDE é elaborado com base nas cotas altimétricas do terreno, que são obtidas de curvas de nível conhecidas, e gera uma grade regular de valores definindo as direções de fluxo, tomando-se por base a declividade do terreno. Foram utilizadas curvas de nível espaçadas de 5 em 5 metros disponibilizadas pela SEGETH no GeoPortal. A ferramenta SIG utilizada para gerar a direção de fluxo do local foi o *software* ArcGIS, através da função *flow direction*.

A etapa de investigação detalhada consiste na aquisição e interpretação de dados da área contaminada. Essa etapa foi desenvolvida com uma análise da evolução das concentrações de poluentes e uma caracterização do meio físico do posto.

A legislação ambiental brasileira traz, por meio da resolução CONAMA nº 420 de 2009, valores orientadores de qualidade da água subterrânea para BTEX e outros hidrocarbonetos. Tais valores serviram de referência para análise da evolução da contaminação existente no posto de abastecimento, assim como significarão meta de remediação para o tratamento que será proposto. Além da resolução CONAMA, a análise da evolução das concentrações de poluentes se alicerçou nos laudos de análise de águas subterrâneas retirados dos estudos ambientais disponibilizados pelo IBRAM. A evolução foi avaliada com base no decaimento das concentrações dos contaminantes.

Com o objetivo de analisar a possível contaminação do córrego da Ponte por contaminantes derivados de combustíveis fósseis, foi realizada uma coleta de água no dia 20 de novembro às 10h29min no referido córrego. O céu estava bem nublado no momento da coleta e foram registradas chuvas nos dias anteriores à coleta. A coleta foi realizada na coordenada latitude: -15.695002° e longitude: -47.856559°, à aproximadamente 600 metros de distância do posto. A amostra de água foi coletada com garrafa coletora simples de 2,5 litros.

Para evitar a depreciação da amostra, a mesma foi levada para o laboratório Aqualit Tecnologia em Goiânia no mesmo dia em uma caixa térmica de isopor refrigerada com gelo.

O laboratório realizou análise dos parâmetros BTEX e PAH, método EPA 8260C para BTEX e método EPA 8270D para PAH. A Figura 3.2 e a Figura 3.3 apresentam a área e o procedimento de coleta da amostra de água do córrego da Ponte.



Figura 3.2. Área de coleta da amostra de água para análise de contaminantes.



Figura 3.3. Procedimento de coleta de amostra de água do córrego da Ponte.





Para caracterização geotécnica do local, foi realizada uma sondagem no dia 13 de junho de 2018, no período matutino. A sondagem foi realizada inicialmente manual, por meio do trado, e logo depois mecanizada e contou com o suporte de dois colaboradores que realizaram o manuseio do equipamento. A sondagem foi realizada até a profundidade de 4 metros. As amostras foram coletadas e armazenadas em sacos e embalagens herméticas, e posteriormente dispostas na sombra para evitar a perda de umidade das amostras. A sondagem foi feita no estacionamento norte do posto, o ponto específico da sondagem encontrava-se pavimentado com blocos intertravados de forma hexagonal.

Na profundidade de aproximadamente 2,9 metros foi detectado um cheiro forte, porém não foi possível identificar o cheiro e a equipe não possuía no local equipamento para análise de ar. Nesse tipo de experimento é fortemente aconselhado não cheirar a amostra, pois os contaminantes presentes no solo podem ser facilmente inalados, apresentando riscos à saúde do técnico. A coleta das amostras e os ensaios foram realizados segundo as normas ABNT.

No laboratório da Universidade de Brasília foram analisados realizados os ensaios: teor de umidade; limite de liquidez; limite de plasticidade; granulometria por sedimentação; massa específica dos grãos; permeabilidade com carga variável.

O teor de umidade das amostras de solo foi analisado no mesmo dia para preservar a integridade do teor das amostras. No total foram analisadas 12 amostras de solo. O teor de umidade foi realizado pelo método da estufa. A massa das amostras foi medida antes e após a secagem, que foi realizada em estufa de temperatura média de 105°C. A secagem foi realizada por um período de 12 horas. O teor de umidade de cada amostra é obtido a partir da diferença de massas e divisão pela massa da amostra seca. A Tabela 3.1 apresenta a descrição das amostras coletadas ao longo da sondagem e apresenta foto das amostras utilizadas para o ensaio de teor de umidade.

Tabela 3.1. Descrição das amostras coletadas durante a sondagem. Profundidades assinaladas com “*” foram feitas de forma mecanizada.

Profundidade (m)	Descrição	Foto das amostras para teor de umidade
0,00 – 0,05	Bloco de concreto.	
0,05 – 0,30	Argila vermelha clara.	
0,30 – 0,40	Areia cor verde amarela clara com pouco silte e argila.	
0,40 – 0,90		
0,90 – 1,10		
1,10 – 1,40		
1,40 – 2,00		
2,00 – 2,20	Areia cor laranja com pouco silte e argila. Apresenta-se misturada com a camada anterior.	
2,20 – 2,50		
2,50 – 2,70		
2,70 – 2,90		
2,90 – 3,15		
3,15 – 3,30*	Areia cor bege com pouco silte.	
3,30 – 3,60*		
3,60 – 4,00*		

O ensaio de limite de liquidez foi realizado com o auxílio do aparelho de Casagrande e o limite de plasticidade utilizando um bastão de 3 mm de diâmetro. Separou-se nove amostras de solo, três para cada profundidade, assim pode-se analisar esse parâmetro ao longo de todo perfil. Entretanto, nos três ensaios, não foi possível determinar nem o limite de liquidez nem o limite de plasticidade. Para o limite de liquidez o solo se fissurava no momento de fazer a ranhura e mesmo que ele estivesse muito seco, a ranhura fechava com três batidas da capsula. No limite de Plasticidade não foi possível atingir os 3 mm de diâmetro do rolinho sem ele se fissurar, só era possível atender esse diâmetro com um conteúdo alto de umidade.



Figura 3.4. Amostra pronta para realização do ensaio de limite de liquidez.



Figura 3.5. Amostra após três batidas.



Figura 3.6. Amostra durante ensaio do limite de plasticidade.

O ensaio de granulometria por sedimentação foi realizado para a fração do solo da profundidade de 3,3 m a 4 m. A partir dos resultados observados dos limites de Atterberg temos uma ideia do tipo de material, ao ser identificado como uma areia (Figura 3.7) tomou-se 120 gramas de solo para a sedimentação. A sedimentação foi realizada com e sem defloculante.



Figura 3.7. Solo separado para realização do ensaio de granulometria.

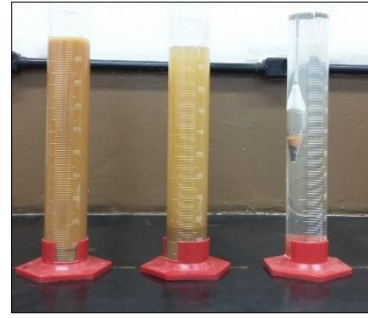


Figura 3.8. Ensaio de granulometria com e sem defloculante.

A determinação da massa específica dos grãos foi feita empregando o penta-picnômetro, devidamente calibrado. Durante a realização do ensaio a temperatura do local se manteve constante, 23°C. Foram realizados dez ensaios e calculou-se a média dos resultados, os 6 melhores valores apresentam um desvio padrão inferior a 0,005.

Para o ensaio de permeabilidade com carga variável moldou-se um corpo de prova no cilindro de proctor standard e colocado na célula com parafina ao redor. O corpo de prova foi posto para saturação durante 24 horas, assim a argila bentônica expande e interrompe os fluxos indesejáveis ao redor da amostra. Pronta a amostra, foram realizadas leituras na coluna de água com o auxílio de uma régua de 100 cm acoplada ao permeâmetro e um cronômetro, foram lidas as alturas entre 100 e 75 cm.



Figura 3.9. Realização de ensaios de permeabilidade com carga variável.

A técnica de remediação foi proposta com base no histórico de contaminação, as características físicas e químicas do contaminante, as características físicas do solo, o tipo de solo, a extensão e a localização da pluma de contaminação, a presença de contaminante em

fase livre, a direção de fluxo, a profundidade do lençol freático e a existência de poços perfurados no local contaminado.

Visando a descontaminação do local e atendimento da resolução CONAMA 420/09, o sistema de remediação ambiental proposto deve ser operado para obter uma eficiência mínima para cada parâmetro, para que estes possam se enquadrar nos seus respectivos valores de investigação. A eficiência mínima de cada parâmetro foi calculada com base na seguinte fórmula:

$$\text{Eficiência de remoção (\%)} = \frac{\text{Concentração atual} - \text{Concentração exigida}}{\text{Concentração exigida}} \times 100$$

4. RESULTADOS OBTIDOS

Conforme apresentado no item 2.3, avaliação do passivo ambiental é realizada em três etapas, e, se caracterizada a contaminação na etapa de avaliação preliminar, não há a necessidade da segunda etapa – avaliação investigatória. Por essa razão, os resultados obtidos ao longo do estudo foram alocadas em sua respectiva etapa de avaliação e serão apresentados nos tópicos seguintes.

4.1.AVALIAÇÃO PRELIMINAR

A etapa inicial da avaliação de passivo ambiental consiste em uma avaliação preliminar, essa avaliação é realizada por meio da coleta de dados existentes sobre o local, podendo também ser realizada uma inspeção de reconhecimento da área, com o propósito de obter-se um diagnóstico inicial da contaminação. Nos tópicos seguintes serão apresentados os dados coletados.

4.1.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O posto em estudo está localizado em frente ao balão do Colorado, região de divisa entre as regiões administrativas do Lago Norte, de Sobradinho e do Plano Piloto, estando o Posto situado na região administrativa do Lago Norte. A principal via de acesso ao Posto é a Estrada Parque Indústria e Abastecimento, sentido sobradinho. A Figura 4.1, a seguir, apresenta a vista frontal do posto de abastecimento. A foto foi tirada no dia 13 de setembro de 2018.

O posto de abastecimento está em operação há pouco mais de 40 anos e atua no comércio varejista de combustíveis para veículos automotores. Atualmente são comercializados os seguintes combustíveis: diesel comum; diesel S-10, etanol, gasolina aditivada e gasolina comum. O sistema de armazenamento subterrâneo de combustíveis do Posto é composto por seis tanques bicompartimentados, que juntos possuem capacidade de armazenamento de 180.000 L, e estão ligados a onze unidades abastecedoras.



Figura 4.1. Vista lateral do posto em estudo.

O empreendimento em tela se encontra próximo ao córrego da Ponte, aproximadamente 500 metros de distância, fato agravante em casos de contaminações por derivados de combustíveis fósseis. A proximidade entre o Posto e o córrego gera preocupações com a qualidade ambiental devido ao risco de contaminação. Em caso de contaminações subterrâneas o contaminante orgânico pode percolar pelo solo até atingir o córrego, pondo em risco espécies aquáticas, a vegetação local e usuários do córrego. A Figura 4.2, a seguir, apresenta o mapa de localização do posto de abastecimento, expondo as principais vias de acesso ao local, bem como a proximidade entre o empreendimento e o córrego da Ponte.

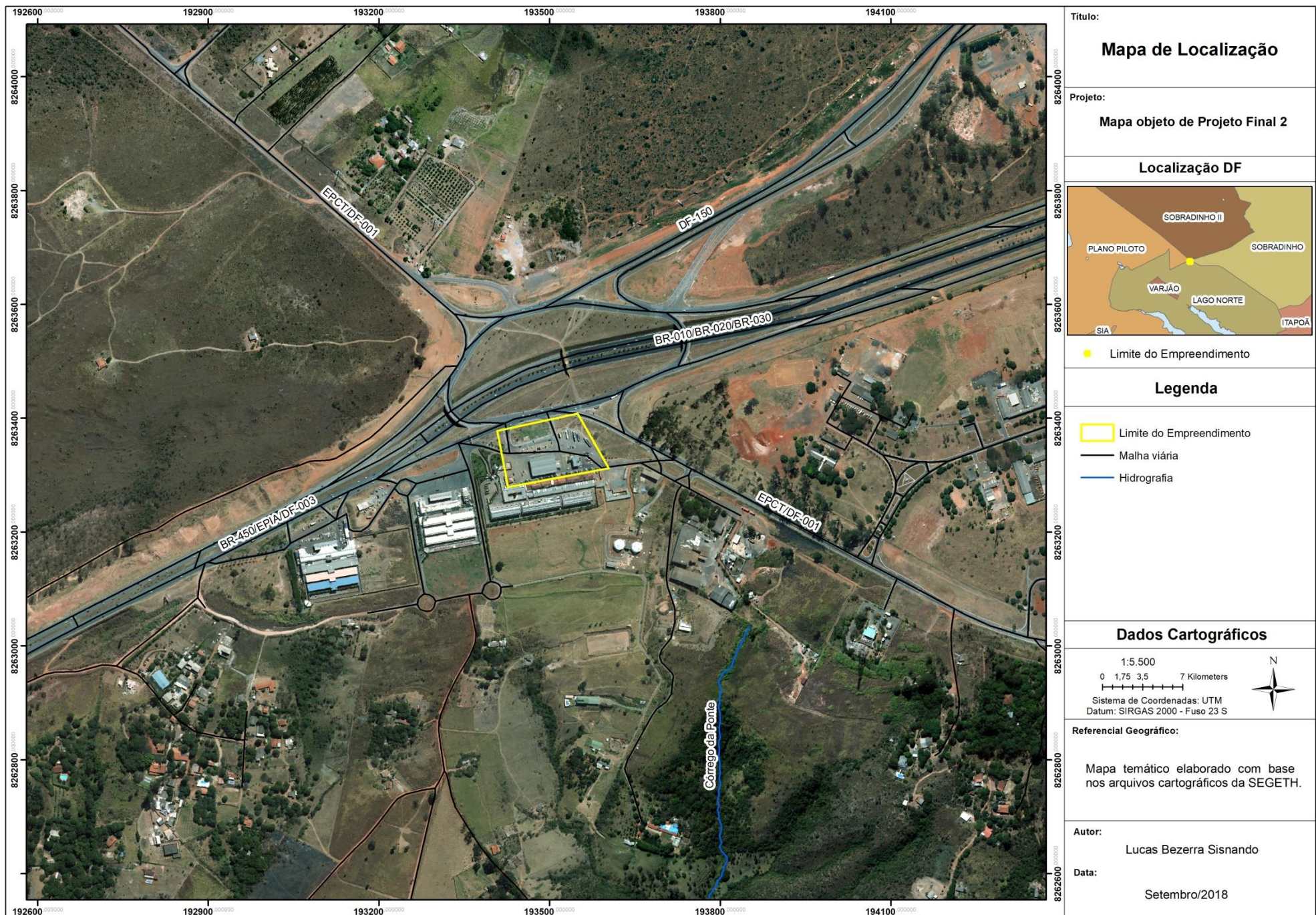


Figura 4.2. Mapa de localização do posto.

4.1.2. HISTÓRICO DE CONTAMINAÇÃO DO POSTO

A realização do estudo histórico do local possibilita a reconstituição da maneira como foram desenvolvidas as atividades de manejo, produção, armazenamento e disposição de substâncias em uma área. O levantamento histórico requer o registro dos dados disponíveis sobre as atividades ocorridas na área em estudo e arredores (ABNT, 2007). De posse desses dados, em conjunto com os demais, é possível definir uma estratégia de remediação de áreas contaminadas.

Os dados históricos que serão apresentados a seguir foram solicitados, via processo SEI, ao Instituto Brasília Ambiental (IBRAM), órgão executor de políticas públicas ambientais e de recursos hídricos no Distrito Federal, que disponibilizou os processos contendo os estudos ambientais realizados no posto. Os dados foram organizados em ordem cronológica para melhor interpretação.

- **Março de 2006**

O histórico de contaminação do Posto em estudo tem início em março de 2006 quando, sob suspeita de contaminação, foi realizado um Estudo de Investigação Ambiental do Solo e das Águas Subterrâneas pela empresa HAZTEC. Nesse estudo foram realizadas diversas sondagens, instalação de poços de monitoramento de lençol freático e análises químicas para os parâmetros BTEX e PAH. O estudo indicou risco à saúde humana, pois tanto as amostras de solo quanto as amostras de água subterrânea apresentaram concentrações de benzeno acima do permitido na legislação.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados das análises de água subterrânea para os poços de monitoramento (PM) e poços de abastecimento de água (PA) existentes no local. Nota-se que os poços de monitoramento 4, 7 e 8 estão em desacordo com o valor de investigação estipulado pela resolução CONAMA 420/09 para o parâmetro benzeno, comprovando a contaminação no local. O PM 7 atestou concentração 238 vezes maior do que o permitido pela legislação.

Tabela 4.1. Análise de água dos poços de monitoramento para os parâmetros BTEX e PAH realizada em março de 2006, dados em (µg/L).

Parâmetro	Substância	Valor de Investigação	PM 1	PM 2	PM 3	PM 4	PM 5	PM 6	PM 7	PM 8	PA 1	PA 2
BTEX	Benzeno	5	-	-	-	507	-	-	1190	188	-	-
	Tolueno	700	-	-	-	28	-	-	178	6	-	-
	Etilbenzeno	300	-	-	-	160	-	-	66	6	-	-
	Xileno	500	-	-	-	212	-	-	228	12	-	-
PAH	Naftaleno	140	-	3,73	-	24,88	-	-	3,48	0,15	-	-
	Fenantreno	140	-	0,38	-	-	-	-	-	-	-	-
	Antraceno	-	-	0,04	-	-	-	-	-	-	-	-
	Criseno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Benzo fluoranteno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Benzo pireno	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Indeno pireno	0,17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dibenzo antraceno	0,18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Benzo perileno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

- **Fevereiro de 2009**

Em fevereiro de 2009 foi realizada uma Investigação de Passivo Ambiental pela empresa TECPAM onde foi informada a substituição de doze tanques de armazenamento de combustível. Nesse estudo foi realizada uma campanha para análise de COV e com base nos resultados foi possível delimitar plumas de isoconcentrações, que se apresentaram localizadas na área de abastecimento.

- **Agosto de 2011**

O estudo seguinte foi realizado pela empresa FULLGEO em agosto de 2011. Foram instalados poços de monitoramento no local com o objetivo de inspecionar a área contaminada, também foram realizadas análises de diversos parâmetros de solo e de água subterrânea, como BTEX e PAH.

Os resultados analíticos das amostras de solo e de água subterrânea revelaram concentrações de compostos BTEX e PAH superiores aos valores orientadores da resolução CONAMA nº 420/2009. Também foi identificada a existência de óleo diesel em fase livre em um dos poços de monitoramento. O presente estudo não teve acesso a tais análises.

Foram identificadas potenciais situações de risco aos ocupantes do local e das imediações do Posto por meio da ingestão de água subterrânea impactada pela lixiviação do solo e por ingestão de água subterrânea contaminada, devido à existência de poços de abastecimento localizados nas áreas do posto. Também foram identificadas potenciais situações de risco através da inalação de vapores em ambientes fechados, como áreas destinadas a troca de óleo e a lavagem de carros, a loja de conveniência do Posto e nas residências vizinhas.

Até o momento não havia sido empregado nenhuma técnica ou qualquer mecanismo de remediação, apenas a troca dos tanques em 2009, porém, a contaminação persistiu.

- **Janeiro de 2013**

Em janeiro de 2013 a empresa TECPAM foi contratada para instalar um sistema de remediação ambiental, cujos principais objetivos eram a eliminação da fase livre, redução da concentração da fase dissolvida, redução da concentração de organovoláteis, bem como tratar toda a água subterrânea.

O sistema de remediação ambiental adotado pela empresa fez uso da técnica de extração multifásica (MPE). Uma das principais vantagens dessa tecnologia é a extração do contaminante presente em fase livre, fase de vapor e fase dissolvida na matriz de solo, além de estimular o processo de biodegradação natural realizado por microrganismos presentes no solo.

Para instalação do sistema foram selecionados 13 poços de monitoramento (PM) e 10 poços de extração (PE), totalizando 23 poços, cabe ressaltar ainda que no local existem dois poços que são utilizados para captação de água subterrânea com a finalidade de abastecimento humano. Assim que detectada a contaminação, o poço que se encontra a jusante da contaminação foi interditado, o outro poço continuou em operação por estar a montante do local contaminado, não sendo influenciado pelos contaminantes a jusante. O sistema foi projetado para operar 24 horas por dia, inclusive aos fins de semana e feriados.

O sistema é constituído por tanque de vácuo, caixa separadora de água e óleo (SAO), bomba de vácuo, sistema de tratamento com carvão ativado, tambor e componentes de controle de efluentes (manômetro, válvulas, registro de pressão, entre outros).

O processo de remediação tem início com a sucção da massa líquida realizada pela bomba de vácuo que encaminha o composto para a primeira caixa separadora de água e óleo. Nessa caixa ocorre a separação da fração líquida, de vapor e do contaminante presente em fase livre (óleo). Os vapores são direcionados para um filtro de carvão ativado onde ocorre o tratamento dos mesmos que em seguida são dispostos na atmosfera. A fração líquida, majoritariamente água, é encaminhada para outro filtro de carvão e em seguida encaminhada para uma segunda caixa separadora de água e óleo, para, por fim, ser encaminhada para a rede de esgoto. O contaminante em fase livre é disposto em tambores e armazenado para posterior coleta por empresa específica responsável por dar respectivo tratamento e destinação ambientalmente adequada. A Figura 4.3 apresenta uma esquematização do processo de remediação ambiental empregado.

O sistema de remediação ambiental teve duração de três anos e meio, sendo paralisado em julho de 2016, e durante todo o processo de remediação foram realizadas coletas e análises de solo e de água subterrânea para avaliar o andamento do processo de remediação. Foram elaborados relatórios de monitoramento ambientais mensais e

semestrais com o objetivo de acompanhar e registrar o mecanismo de remediação. No decorrer do processo de remediação não foi encontrado contaminante em fase livre.

- **Março de 2017**

Durante todo o processo de remediação foi possível observar a redução das concentrações dos contaminantes, porém, no Relatório de Monitoramento Ambiental realizado após cessado o sistema de remediação ambiental, foi constatada a presença de pluma de contaminação de fase livre e o aumento da concentração de contaminantes, principalmente de benzeno.

O Relatório de Monitoramento Ambiental foi elaborado pela empresa TECPAM em março de 2017 e teve como principal objetivo a realização de coletas de amostras de água nos poços existentes a fim de verificar a qualidade ambiental da água dos poços e analisar a possível continuidade da contaminação, bem como quantificar a concentração de poluentes no local.

A empresa realizou a coleta de 22 amostras de água para análise de BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos) e PAH (Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos), sendo 10 amostras de poços de monitoramento de lençol freático, 10 amostras de poços de extração e 2 amostras dos poços de água existentes, uma de cada. Durante a coleta foi detectada a presença de contaminante em fase livre nos poços de extração PE 1, PE 2, PE 3 e PE 10.

Os resultados das análises de água atestam valores de BTEX em desacordo com os valores orientadores da resolução CONAMA nº 420/09 para o poço de monitoramento PM 18 e para os poços de extração PE 1, PE 2, PE 3, PE 4, PE 5, PE 7, PE 8, PE 9 e PE 10. As análises dos poços utilizados para captação de água mostraram-se em conformidade com a resolução CONAMA nº 420 de 2009. Tais análises serão apresentadas no item 4.2.1, onde será realizada uma análise da evolução das concentrações de BTEX e PAH.

Embora não tenha sido constatada a presença de hidrocarbonetos oriundo dos combustíveis no poço de abastecimento de água a jusante da contaminação, o relatório recomenda a continuidade da suspensão do uso da água do mesmo, em favor da segurança aos usuários.

O relatório ainda apresenta a provável pluma de contaminação em fase livre existente no Posto, Figura 4.4, e recomenda a instalação de um novo sistema de remediação ambiental, com o propósito de remover o contaminante em fase livre e reduzir as concentrações dos poluentes em fase dissolvida.

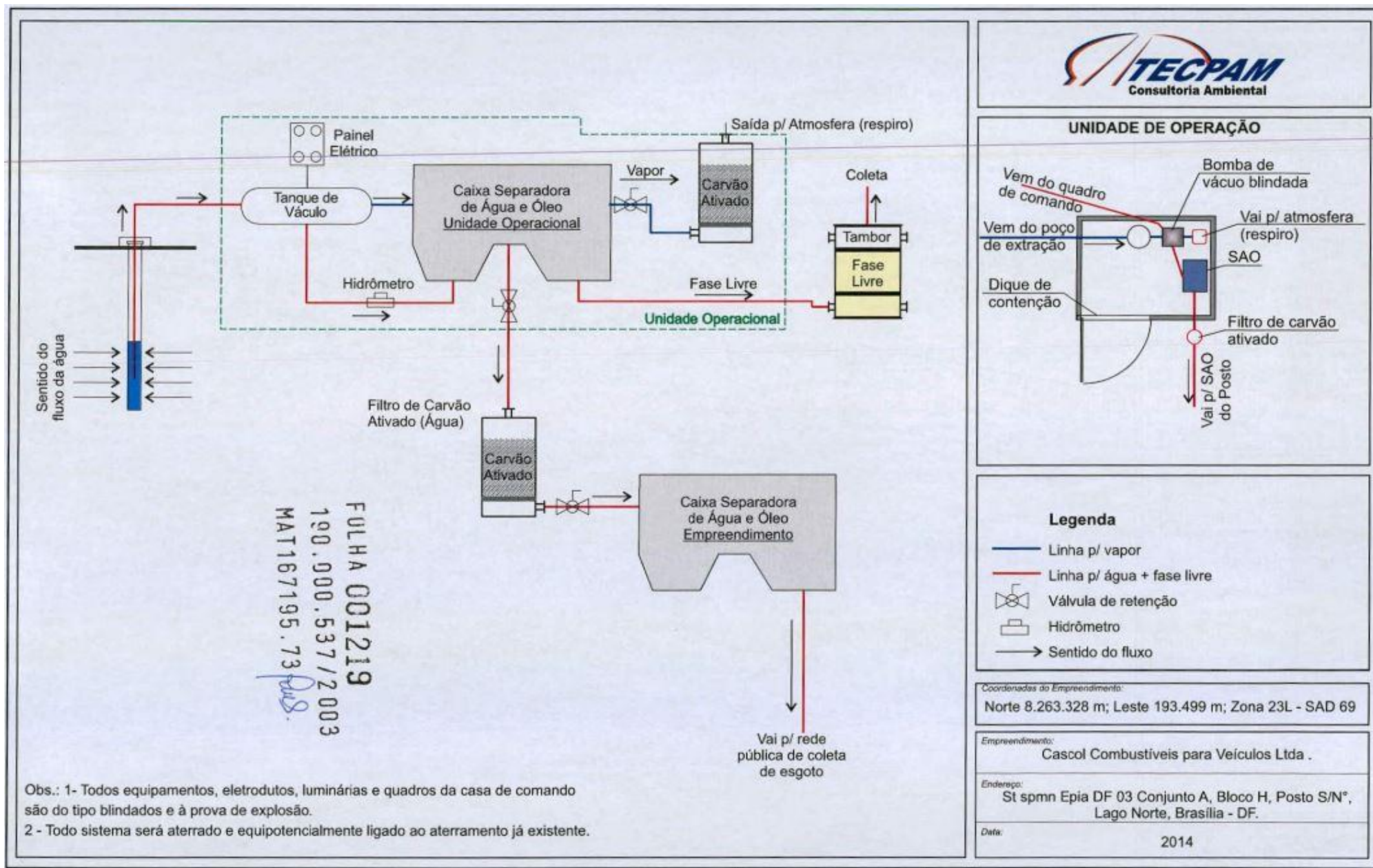


Figura 4.3. Esquema de funcionamento do sistema de remediação ambiental (TECPAM, 2013).



4.1.3. CARACTERIZAÇÃO PEDOLÓGICA

A análise do tipo de solo predominante no empreendimento é uma importante ferramenta para a escolha da técnica de remediação, já que o fluxo de contaminantes orgânicos no solo é diferente para cada tipo de solo, podendo o contaminante infiltrar pelo solo com mais facilidade ou o mesmo ficar retido no solo, dificultando a sua percolação. Zytner (1994) cita que, para a gasolina, esse transporte é complexo, pois é função das diferentes propriedades do solo e da fase do contaminante. A partir da Figura 4.5 pode-se observar que o posto está inserido em duas unidades pedológicas distintas: cambissolo e areias quartzosas.

Os cambissolo são solos que apresentam horizonte subsuperficial submetido a pouca alteração física e química, porém, suficiente para desenvolvimento de cor e estrutura. Na maioria dos casos, apresentam minerais primários facilmente intemperizáveis, teores mais elevados de silte, indicando baixo grau de intemperização. No DF correspondem a 30,98% da área e estão associados a relevos ondulados e forte-ondulados (Embrapa, 2004).

São solos pouco desenvolvidos, caracterizados principalmente por apresentarem horizonte câmbico (Soil Taxonomy, 1975). Apresentam em geral calhaus, cascalhos, concreções e fragmentos de rochas ao longo dos perfis, concentrando-se a maior parte na superfície do solo. Desenvolvem-se a partir da decomposição de filitos, ardósias e metassiltitos (Embrapa, 1978.)

As areias quartzosas são solos minerais, pouco desenvolvidos, profundos, não hidromórficos, textura arenosa, excessivamente drenados, porosos e muito susceptíveis à erosão. São formados por material arenoso e possuem permeabilidade rápida ao longo de todo o perfil. São solos desenvolvidos a partir de cobertura de material psamítico, relacionado a quartzitos e originados da desagregação das rochas subjacentes, sendo portanto, autóctones. Ocorrem em áreas de relevo plano e suave ondulado com declividades que variam de 0 a 8% (Embrapa, 1978).

A sorção é o processo pelo qual a maioria dos produtos químicos derramados são removidos do solo. A sorção é a combinação da adsorção e da absorção. A adsorção é definida como a condensação de gases nas superfícies livres do solo ou a fixação de solutos de uma solução na superfície de um sólido, enquanto a absorção é o absorvimento de um soluto pelo solo (Zytner, 1994).

A sorção pode ser positiva ou negativa. Uma sorção positiva ocorre quando existe uma atração entre o fluido e a superfície dos grãos de solo, e uma sorção negativa ocorre quando o fluido não é absorvido (ou adsorvido) pelos grãos de solo. Solos que “repelem” fluidos consequentemente aumentam sua percolação na matriz de solo, acelerando seu processo de espalhamento atingindo o lençol freático com mais rapidez.

Posto isso, pode-se relacionar a sorção de um solo com a sua capacidade de retenção de contaminantes. Em um estudo realizado por Zytner (1994), foi analisada a capacidade de sorção de BTEX de três tipos de solo (arenoso, orgânico superior e argiloso). O solo arenoso foi o que obteve pior desempenho em sorver BTEX.

Além disso, o estudo de Zytner (1994) analisou a capacidade de troca iônica desses três tipos de solo, onde o solo arenoso apresentou a menor CTC. A CTC é a quantidade total de cátions trocáveis que um solo pode adsorver e é influenciada pelo pH, teor de argila e matéria orgânica. Quanto maior o pH, o teor de argila e o teor de matéria orgânica, maior é a CTC e maior é a fertilidade do solo. Maiores valores de CTC também estão ligados aos maiores valores de nutrientes e matéria orgânica (Leite *et al*, 2011).

A diminuição da CTC acarreta na redução da disponibilidade de Ca^{2+} e Mg^{3+} para os microrganismos o que pode afetar, negativamente, o processo de biorremediação, uma vez que esses macronutrientes são utilizados pelos microrganismos para sintetizar componentes celulares. Sabe-se que bactérias utilizam o cálcio para estabilizar a parede celular e o magnésio para estabilizar os ribossomos (Mariano, 2006).

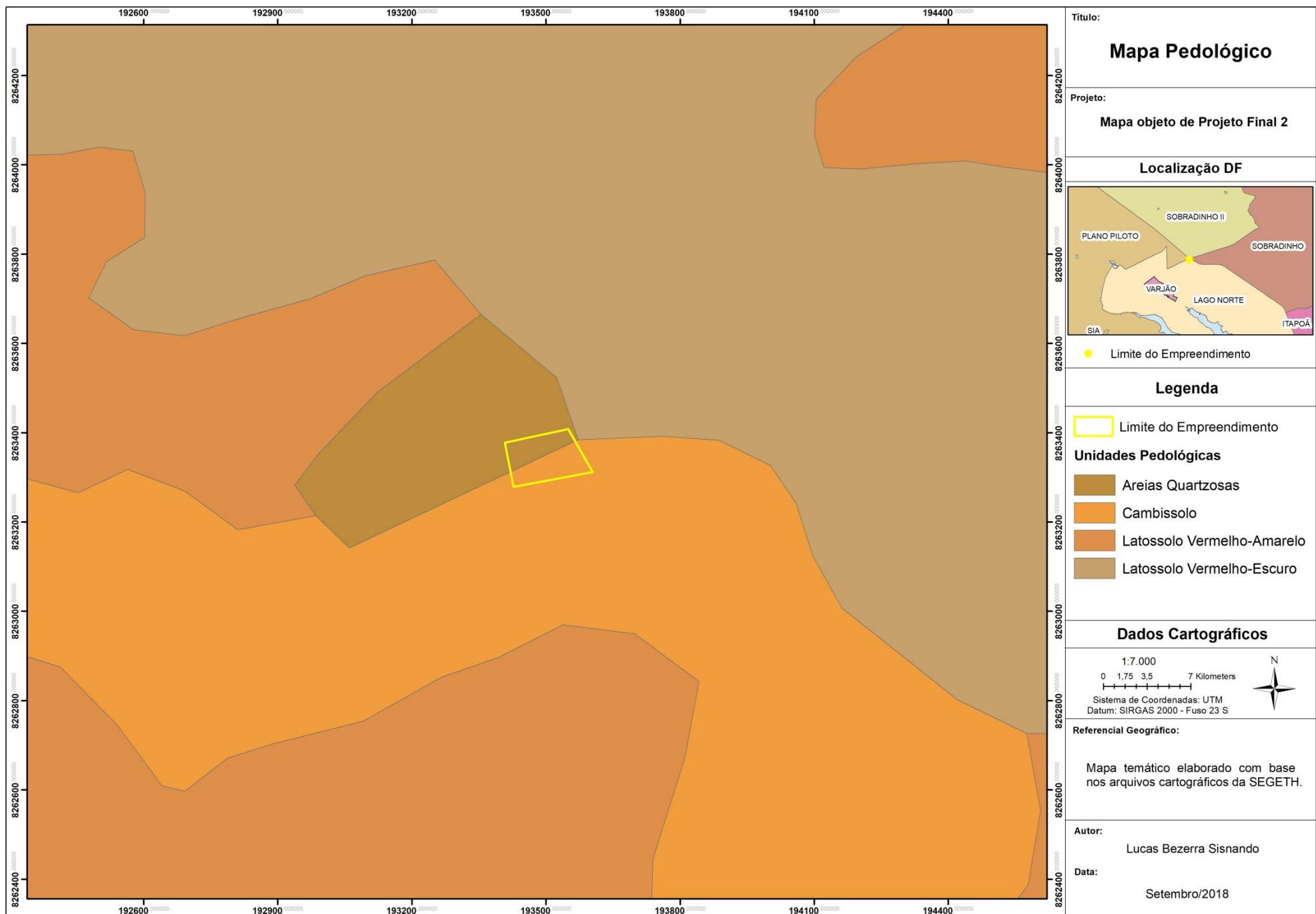


Figura 4.5. Mapa Pedológico do posto.

4.1.4. DIREÇÃO DE FLUXO SUPERFICIAL

De acordo com Rennó *et al.* (2008), a direção de fluxo define as relações hidrológicas entre pontos diferentes dentro de uma bacia hidrográfica. A continuidade topológica para as direções de fluxo é, conseqüentemente, necessária para que uma drenagem funcional possa existir.

Através da direção de fluxo é possível conhecer a direção do escoamento da região, essa é uma importante ferramenta de gestão pois tendo conhecimento desse parâmetro é possível inferir a direção do fluxo de contaminantes e a área a ser atingida pelo poluente. De posse dessa informação é possível tomar medidas para impedir o fluxo de contaminantes, minimizando o impacto a jusante da contaminação e estabelecendo um processo de remediação mais eficiente.

Segundo Zytner (1994), a gasolina, uma vez liberada no meio, uma fração volatiliza para a atmosfera e outra contamina o solo tendo potencial para migrar através do mesmo e contaminar as águas subterrâneas. Visto que a gasolina é uma mistura de muitos hidrocarbonetos voláteis e semi-voláteis, incluindo benzeno, tolueno, etilbenzeno e-xileno (BTEX), os derrames representam riscos para a saúde pública. Os maiores riscos para a saúde ocorrem em locais onde a população depende dos lençóis freáticos para o abastecimento de água potável.

A Figura 4.6 apresenta a direção de fluxo gerada para a região, sendo o sentido do escoamento representado pelas setas azuis. O corpo hídrico mais próximo do posto em análise é o córrego da Ponte, cerca de 500 metros de distância, fato que gera uma preocupação com a segurança hídrica da região, principalmente se este for utilizado pela população local para atividades recreativas e/ou dessedentação da fauna existente próximo ao córrego. Também é possível observar pela figura que todo escoamento da região converge para o córrego da Ponte. Fato preocupante tendo em vista que resíduos provenientes da lavagem de carros e do derramamento de combustíveis podem atingir o córrego da Ponte.

A qualidade hídrica do córrego da Ponte é de grande importância para a população do Distrito Federal, tendo em vista que este desagua no Lago Paranoá que atualmente é utilizado como fonte de captação de água para abastecimento humano, além de outros usos recreativos e de relativa importância ambiental para o ecossistema local.

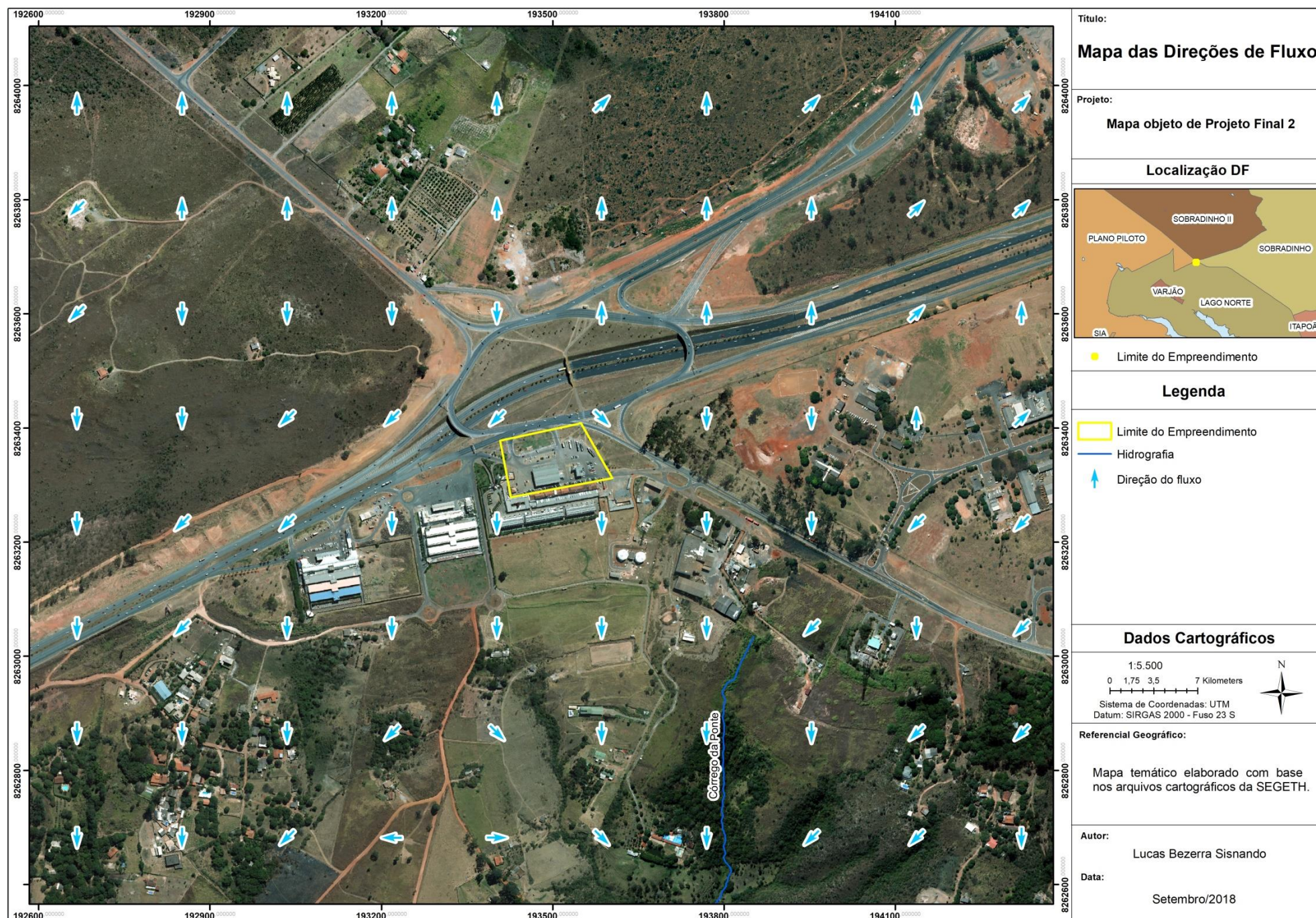


Figura 4.6. Mapa da direção de fluxo do posto e entorno.

4.1.5. NÍVEL FREÁTICO

A profundidade do lençol freático é um parâmetro importante para escolha da técnica de remediação, ao passo que tendo conhecimento da profundidade do lençol freático é possível dimensionar os componentes da técnica de remediação. Além disso, contaminações muito profundas podem inviabilizar a aplicação de algumas técnicas por tornar o processo muito oneroso.

A Tabela 4.2 apresenta o nível de água para alguns poços existentes no posto de abastecimento. Os valores apresentados na tabela a seguir foram obtidos pela empresa Fullgeo Diagnóstico e Remediação Ambiental em agosto de 2011. Cabe destacar a sazonalidade da amostragem, uma vez que agosto é no final do período de estiagem em Brasília. Esse é um dado importante para dimensionamento do sistema de remediação, por meio dos níveis de água no final do período de seca tem-se uma hipótese dos níveis mais baixos do lençol freático. Nos meses chuvosos é esperado uma elevação do nível do lençol freático.

Tabela 4.2. Nível freático para diferentes poços de extração e monitoramento, Fullgeo Diagnóstico e Remediação Ambiental, 2011.

Poços	Nível de água (m)
PE-04	4,60
PE-06	4,64
PE-07	4,62
PE-09	4,60
PM-02	4,68
PM-05	4,30
PM-15	3,98

4.2.INVESTIGAÇÃO DETALHADA

Com base no que foi apresentado na avaliação preliminar, não há a necessidade de realização de investigação confirmatória, tendo em vista que o histórico de contaminação do posto, em seu último relatório, datado de março de 2017, confirmou valores de investigação em desacordo com a CONAMA 420/09, comprovando a existência de contaminação no local.

Nos tópicos seguintes serão apresentados o comportamento da concentração de poluentes no Posto em estudo ao longo do tempo, e os resultados do levantamento de dados primários no local. Essas informações, bem como as obtidas na avaliação preliminar, servirão de insumo para a escolha da técnica de remediação.

4.2.1. ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE POLUENTES

O processo de remediação ambiental teve início em janeiro de 2013 com a utilização da técnica de extração multifásica e durou 46 meses, sendo finalizado em outubro de 2016. Essa técnica combina às técnicas de bioventilação e extração de vapor do solo, possibilitando a remoção do contaminante da fase livre, fase de vapor e fase dissolvida na matriz do solo, essa é uma das principais vantagens do método.

Diante da constatação da presença de contaminantes na água subterrânea do posto de abastecimento, em janeiro de 2013 foi instalado e operado um sistema de remediação ambiental pela empresa TECPAM Tecnologia e Planejamento Ambiental Ltda. Nota-se a demora desde a apuração da contaminação até o início do processo de remediação, acontecimento que agrava os danos ambientais e socioeconômicos sofridos no local. O sistema de remediação foi finalizado em outubro de 2016, totalizando três anos e dez meses de operação. Segundo a empresa TECPAM (2017), o sistema de remediação ambiental foi paralisado devido à ausência de fase livre na área contaminada e devido à desativação do uso do poço de abastecimento de água a jusante do posto.

A legislação ambiental brasileira traz, por meio da resolução CONAMA nº 420 de 2009, valores de investigação de qualidade da água subterrânea para BTEX e outros hidrocarbonetos. Tais valores serviram de referência para análise da evolução da contaminação existente no posto em estudo.

O estudo da evolução de BTEX e PAH pode ser feita analisando a redução, ou aumento, da concentração desses poluentes na área contaminada ao longo do tempo, isso se dá por meio das análises dos laudos. O presente estudo teve acesso aos laudos das análises de água dos poços do posto referentes há quatro anos distintos: 2006, 2015, 2016 e 2017. Os laudos foram retirados dos estudos ambientais obtidos via processo SEI do IBRAM. Ressalta-se que não há outros laudos de água subterrânea no processo disponibilizado, fator que impossibilita a análise desde o início de aplicação da técnica.

Conforme apresentado no item 4.1.2, a primeira análise data de março de 2006, esta então, foi realizada bem antes do início do sistema de remediação ambiental. Essa primeira análise foi realizada com o objetivo de confirmar a existência de uma contaminação no posto, que foi provocada por hidrocarbonetos orgânicos derivados de combustíveis fósseis.

A segunda análise (Tabela 4.3 e Tabela 4.4) dos poços de água disponibilizada para o presente estudo data de janeiro de 2015, transcorridos dois anos de operação do processo de remediação. A terceira análise (Tabela 4.5 e Tabela 4.6), por sua vez, foi realizada em julho de 2016, data próxima de encerramento do sistema de remediação, e a quarta análise (Tabela 4.7 e Tabela 4.8), a mais recente, foi realizada em março de 2017, transcorridos cinco meses do encerramento do sistema de remediação. Os valores em desacordo com a legislação ambiental estão assinalados em amarelo nas respectivas análises.

Foram realizadas análises dos parâmetros BTEX e PAH, que foram executadas por laboratório terceirizado e devidamente certificado pelo INMETRO. Os laudos foram interpretados e organizados em tabelas para melhor visualização dos dados e são apresentadas a seguir. Os poços de monitoramento da qualidade de água são representados pela sigla “PM” e os poços utilizados para extração de contaminante durante a aplicação da técnica de remediação são representados pela sigla “PE”. A primeira análise (março de 2006) não abrange os poços de extração por que estes ainda não haviam sido perfurados, fato que ocorreu com a implantação do sistema de remediação.

Para fins de análise do comportamento das concentrações de contaminantes durante a aplicação do sistema de remediação ambiental - instrumentalizado pela técnica extração multifásica - serão estudados o segundo e o terceiro laudo, já que somente estes foram levantados durante a aplicação da técnica. O quarto laudo servirá para análise da evolução da concentração dos poluentes após cessada a aplicação da técnica.

Tabela 4.3. Análise de água dos poços de monitoramento para os parâmetros BTEX e PAH realizada em janeiro de 2015, dados em (µg/L).

Parâmetro	Substância	Valor de Investigação	PM 1	PM 2	PM 5	PM 15	PM 16	PM 17	PM 19	PM 20
BTEX	Benzeno	5	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	61	< 1
	Tolueno	700	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
	Etilbenzeno	300	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
	Xileno	500	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3
PAH	Naftaleno	140	1	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Fenantreno	140	0,46	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,94	< 0,01
	Antraceno	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Criseno	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Benzo fluoranteno	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Benzo pireno	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Indeno pireno	0,17	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Dibenzo antraceno	0,18	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Benzo perileno	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Tabela 4.4. Análise de água dos poços de extração para os parâmetros BTEX e PAH realizada em janeiro de 2015, dados em (µg/L).

Parâmetro	Substância	Valor de Investigação	PE 1	PE 4	PE 6	PE 7	PE 9
BTEX	Benzeno	5	303	1983	81	9030	201
	Tolueno	700	< 1	326	< 1	9588	26
	Etilbenzeno	300	108	681	< 1	1311	555
	Xileno	500	11	2318	< 3	8006	77
PAH	Naftaleno	140	200,39	222,1	2,08	309,75	172,43
	Fenantreno	140	4,03	4,7	< 0,01	< 0,01	1,15
	Antraceno	-	113,92	4,3	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Criseno	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Benzo fluoranteno	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Benzo pireno	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Indeno pireno	0,17	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Dibenzo antraceno	0,18	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Benzo perileno	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Tabela 4.5. Análise de água dos poços de monitoramento para os parâmetros BTEX e PAH realizada em julho de 2016, dados em (µg/L).

Parâmetro	Substância	Valor de Investigação	PM 2	PM 3	PM 5	PM 15	PM 16	PM 17	PM 18	PM 19	PM 20	PM 21
BTEX	Benzeno	5	116	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	175	< 1	< 1	< 1
	Tolueno	700	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
	Etilbenzeno	300	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	60	< 1	< 1	< 1
	Xileno	500	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	64	< 3	< 3	< 3
PAH	Naftaleno	140	1,94	1,08	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	239,4	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Fenantreno	140	2,64	0,52	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	308	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Antraceno	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Criseno	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Benzo fluoranteno	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Benzo pireno	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Indeno pireno	0,17	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Dibenzo antraceno	0,18	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Benzo perileno	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Tabela 4.6. Análise de água dos poços de extração para os parâmetros BTEX e PAH realizada em julho de 2016, dados em (µg/L).

Parâmetro	Substância	Valor de Investigação	PE 1	PE 2	PE 3	PE 4	PE 5	PE 6	PE 7	PE 8	PE 9	PE 10
BTEX	Benzeno	5	218	157	364	252	262	11	2804	1138	59	210
	Tolueno	700	< 1	12	80	67	279	< 1	383	< 1	7	< 1
	Etilbenzeno	300	< 1	256	203	266	702	< 1	852	63	293	690
	Xileno	500	< 3	199	401	929	2255	< 3	3325	33	64	150
PAH	Naftaleno	140	165	379	486	105,82	379,9	9,1	426,16	48,79	113,14	970
	Fenantreno	140	145	216	283	2,18	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,57	2,06	694
	Antraceno	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Criseno	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Benzo fluoranteno	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Benzo pireno	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Indeno pireno	0,17	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Dibenzo antraceno	0,18	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Benzo perileno	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Tabela 4.7. Análise de água dos poços de monitoramento para os parâmetros BTEX e PAH realizada em março de 2017, dados em (µg/L).

Parâmetro	Substância	Valor de Investigação	PM 2	PM 3	PM 5	PM 15	PM 16	PM 17	PM 18	PM 19	PM 20	PM 21
BTEX	Benzeno	5	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	99	< 1	< 1	< 1
	Tolueno	700	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
	Etilbenzeno	300	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
	Xileno	500	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3
PAH	Naftaleno	140	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	49,4	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Fenantreno	140	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	24,6	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Antraceno	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Criseno	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Benzo fluoranteno	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Benzo pireno	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Indeno pireno	0,17	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Dibenzo antraceno	0,18	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Benzo perileno	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Tabela 4.8. Análise de água dos poços de extração para os parâmetros BTEX e PAH realizada em março de 2017, dados em (µg/L).

Parâmetro	Substância	Valor de Investigação	PE 1	PE 2	PE 3	PE 4	PE 5	PE 6	PE 7	PE 8	PE 9	PE 10
BTEX	Benzeno	5	65	175	228	513	39	< 1	657	561	43	130
	Tolueno	700	< 1	12	19	13	12	< 1	14	< 1	< 1	< 1
	Etilbenzeno	300	22	133	112	342	62	< 1	120	< 1	76	51
	Xileno	500	< 3	122	200	940	84	< 3	442	< 3	11	< 3
PAH	Naftaleno	140	25,43	3,21	66,65	96,98	9,96	< 0,01	67,03	4,08	3,48	83,5
	Fenantreno	140	4,5	0,68	27,4	0,35	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	70,15
	Antraceno	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Criseno	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Benzo fluoranteno	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Benzo pireno	0,7	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Indeno pireno	0,17	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Dibenzo antraceno	0,18	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
	Benzo perileno	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

É possível observar nas tabelas a falta de continuidade do número de poços analisados. A subtração do número do poço de uma análise para outra é justificada pelo fato de que durante a coleta o poço encontrava-se seco ou que este teve sua nomenclatura alterada, passando de PM para PE com a aplicação da técnica de remediação. A adição de novos poços às análises se dá pelo fato de que ao longo do processo de remediação novos poços foram perfurados. Cabe destacar que a numeração dos poços foi realizada pela empresa de coleta e análise das amostras.

Iniciado o processo de remediação, as análises de água mostram a redução das concentrações de contaminantes ao longo dos anos. Essa diminuição pode ser observada ao comparar a segunda e a terceira análise. Podemos pegar como exemplo o PE 7, um dos poços mais críticos, que chegou a atingir 9.030 µg/L para o poluente benzeno no laudo de 2015, valor 1.806 vezes maior do que o valor de investigação apresentado pela resolução, e na análise seguinte apresentou 2.804 µg/L, uma redução de 69% da concentração de benzeno, mas ainda em desacordo com os valores de investigação. Outro exemplo é o PE 6 que teve redução de 86,4%, passando de 81 µg/L na segunda análise para 11 µg/L na terceira análise.

Entretanto, essa redução não é regular e nem geral. Ao analisar o PE-1 da segunda para a terceira amostra observa-se uma redução substancial da concentração de benzeno, etilbenzeno e xileno, porém ocorreu um aumento de aproximadamente 36 vezes a concentração de fenantreno, atingindo valor superior ao valor de investigação.

É fato que houve uma importante e relevante redução da concentração de contaminantes do local. Entretanto, ao se observar a última análise nota-se que a concentração de poluentes voltou a aumentar. Ao todo, dez poços se encontram em desacordo com os valores de investigação da resolução, sendo o poluente benzeno o contaminante que mais se destaca. A concentração de benzeno do poço de extração 7 está mais de 131 vezes maior do que o valor permitido e o poço de extração 4 possui concentrações de três poluentes incompatíveis com a legislação.

Ao analisar o PE-4, nota-se uma redução significativa da concentração de BTEX e naftaleno durante a aplicação da técnica de remediação e ao comparar a terceira e a quarta análise observa-se o aumento da concentração de três poluentes: benzeno, etilbenzeno e xileno. O benzeno mais do que dobrou a sua concentração, um aumento de 103,6%.

O aumento da concentração de poluentes ao longo das análises pode ser justificado pela possível permanência da fonte de contaminação no local, prolongando o processo de contaminação já que a fonte continua emitindo poluentes. Para o posto, as possíveis fontes de contaminação são os tanques de combustíveis e o próprio solo, que se encontrou como receptor de poluentes durante muitos anos, podendo este ter armazenado grandes quantidades de contaminante liberando-o pouco a pouco, trabalhando como uma fonte de contaminação.

Os postos de combustíveis são compostos por tanques subterrâneos de armazenamento de combustíveis, bombas para abastecimento e boxes para troca de óleo e para lavagem de veículos. As principais fontes de contaminação nestes postos são caracterizadas por: derramamentos durante as operações de transferência do produto para os tanques; transbordamentos; vazamento no sistema devido à corrosão do tanque e/ou das tubulações subterrâneas; e falhas estruturais dos tanques (Martins, 2007; Neves, 2010). A última troca de tanques de armazenamento de combustíveis realizada no Posto ocorreu em 2009, há nove anos.

Além do aumento da concentração de poluentes em alguns poços, a suposição da existência de uma fonte de contaminação é embasada pelo fato de que durante a quarta análise foi percebida a presença de contaminante em fase livre, ou seja, contaminante “novo” na água subterrânea, e que, segundo os estudos ambientais realizados, durante o período de remediação a pluma de fase livre havia sido sanada. Desde o encerramento do sistema de remediação ambiental (outubro de 2016) até a quarta análise (março de 2017) não houve qualquer remediação no local.

Em relação à eficiência de remediação da técnica extração multifásica para derivados de hidrocarbonetos, por não se ter conhecimento da magnitude inicial da contaminação existente no posto é difícil avaliar a eficiência de remoção do processo de acordo com o tempo incorrido, já que para qualquer técnica quanto maior a contaminação maior será o tempo despendido na remediação.

Outra importante análise de eficiência de um sistema de remediação ambiental é a relação dos custos empregados no processo de remediação comparado aos custos de técnicas alternativas, porém, o custo total - perfuração de poços, análises de água, custos incorridos na operação do sistema - bem como, o custo da técnica de extração multifásica não foram disponibilizados.

Do ponto de vista dos valores de investigação da resolução CONAMA 420/09, os valores apresentados na terceira análise de água, análise próxima ao encerramento do sistema de remediação (Tabela 4.5 e Tabela 4.6), confirmam a ineficiência do processo de remediação empregado no posto, tendo em vista a persistência da poluição por BTEX e PAH, principalmente o benzeno.

A perda de eficiência de um sistema de remediação ambiental está diretamente associada à ocorrência de falhas operacionais durante o emprego da técnica. O posto continuou em operação durante todo o processo de remediação fato que pode ter contribuído para ocorrência de novos aportes de poluentes no solo e na água subterrânea, além da incerteza quanto a suspensão da fonte de contaminação. De nada adianta remediar uma área se os vazamentos continuarem a ocorrer.

4.2.2. ANÁLISE DE QUALIDADE DE ÁGUA – CÓRREGO DA PONTE

Durante a etapa de avaliação preliminar, no item 4.1.4, pôde-se observar que o escoamento da região converge para o córrego da Ponte, fato que gera preocupação sobre a possível contaminação do mesmo. Nesse sentido, no mês passado foi realizada a coleta de uma amostra de água superficial no córrego com o intuito de avaliar a dimensão da contaminação existente no posto, se essa atingiu, ou não, o córrego mais próximo.

A amostra foi coletada a aproximadamente 644 metros de distância do foco de contaminação do posto de combustível. Não foi possível realizar tal coleta mais próxima do posto, pois o local é de difícil acesso, com a presença de mata fechada. A Figura 4.7 apresenta o mapa de localização do ponto de coleta da amostra de água do córrego da Ponte.

A amostra foi levada para o laboratório Aqualit Tecnologia em Saneamento, em Goiânia, onde foram analisados os parâmetros BTEX e PAH. Por se tratar de água superficial, o comparativo entre os valores de investigação da CONAMA 420/09 e os resultados da análise seriam errôneos, visto que os valores máximos dos parâmetros de qualidade de águas superficiais são estabelecidos pela resolução CONAMA 357 de 2005.

Os valores máximos dos parâmetros BTEX e PAH bem como os resultados da amostragem realizada no córrego da Ponte são apresentados na Tabela 4.9.

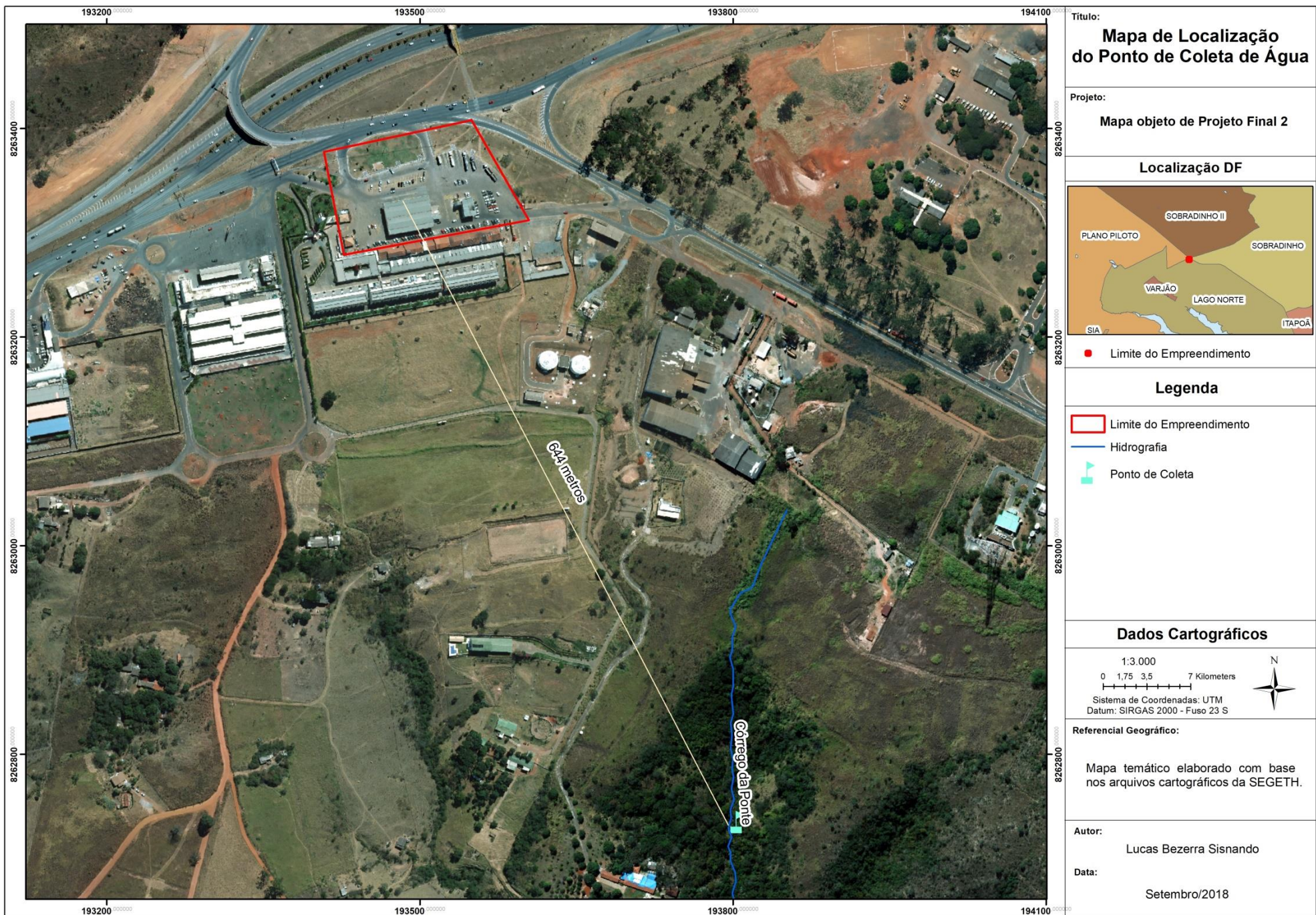


Figura 4.7. Mapa de localização do ponto de coleta de água do córrego da Ponte para análise de BTEX e PAH.

Tabela 4.9. Análise de água superficial para os parâmetros BTEX e PAH realizada em novembro de 2018 no córrego da Ponte, dados em (µg/L).

Parâmetro	Substância	CONAMA 357 (µg/L)	Ponto córrego da Ponte
BTEX	Benzeno	5	< 0,02
	Tolueno	2	< 0,01
	Etilbenzeno	90	< 0,02
	Xileno	300	< 0,01
PAH	Acenafteno	-	< 0,01
	Acenaftileno	-	< 0,01
	Antraceno	-	< 0,01
	Benzo antraceno	0,05	< 0,001
	Benzo pireno	0,05	< 0,001
	Benzo perileno	-	< 0,001
	Benzo fluoranteno	0,05	< 0,001
	Criseno	0,05	< 0,01
	Dibenzo antraceno	0,05	< 0,01
	Fenantreno	-	< 0,01
	Fluoranteno	-	< 0,01
	Fluoreno	-	< 0,01
	Indeno pireno	0,05	< 0,01
	Naftaleno	-	< 0,01
	Pireno	-	< 0,01

Ao observar a tabela acima, nota-se que todas as substâncias encontram-se em conformidade com os valores máximos definidos pela resolução CONAMA 357/05 para águas superficiais. Por essa análise, pode-se inferir que a pluma de contaminação não atingiu o córrego da Ponte no ponto de coleta. Porém, não é possível afirmar que a pluma de contaminação se limita aos limites do posto e que essa não afetou a qualidade do córrego da Ponte ao longo dos 12 anos de contaminação, sendo necessários novos estudos ambientais para avaliar a real implicação dessa contaminação.

4.2.3. CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO

O solo é constituído basicamente por partículas que podem ser agrupadas de acordo com as dimensões dos grãos. As partículas contidas em determinada faixa são classificadas como pedregulho, areia, silte e argila; sendo que a areia ainda pode ser subdividida e qualificada como grossa, média e fina (Neves *et al.*, 2005). A partir dos resultados do ensaio de granulometria por sedimentação, com e sem defloculante, foi possível gerar a curva granulométrica para o solo do posto de abastecimento, Figura 4.8.

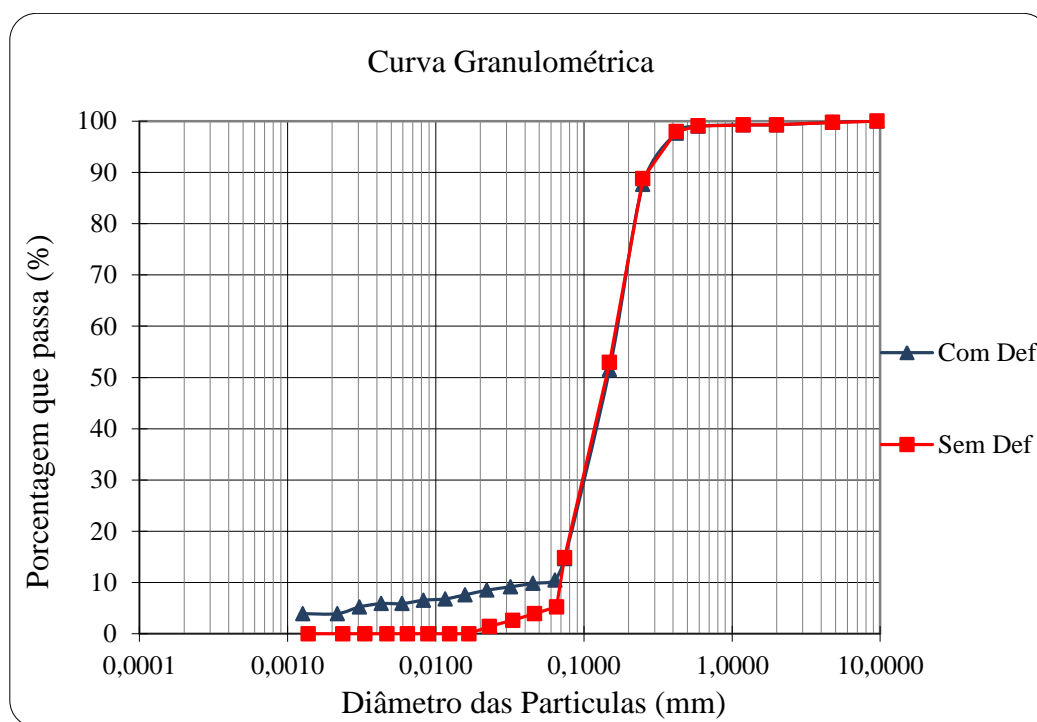


Figura 4.8. Curva granulométrica do solo do posto.

Segundo a classificação granulométrica dos constituintes do solo (ABNT, 1995), pode-se notar na curva granulométrica sem defloculante (Figura 4.8) que aproximadamente 95% do solo possui diâmetro entre 0,06 e 2 mm, sendo classificado como areia – elemento inerte e sem coesão. A parcela restante é composta principalmente por silte, grãos com diâmetro de 0,002 até 0,06 mm. Nota-se ainda que praticamente não há a presença de argila no ensaio sem defloculante, já que foram detectados uma parcela muito pequena de partículas com diâmetro inferior a 0,002 mm. O que não ocorreu no ensaio com defloculante, onde foi encontrado aproximadamente 4% de argila. Isso por que o defloculante provoca a desagregação das partículas, tornando o material mais fino.

Durante os ensaios não foi possível estabelecer um limite de liquidez e um limite de plasticidade para as amostras de solo, pois o mesmo apresentou um elevado teor de areia. Não

foi possível identificar se essa areia é originária do local ou se esta foi inserida durante a construção do posto, no processo de instalação dos tanques, já que o ponto de sondagem encontrava-se próximo aos tanques subterrâneos de armazenamento de combustível. Por essa razão, o solo foi classificado como não plástico e com limite de liquidez muito baixo - solo arenoso. A determinação da massa específica dos grãos foi feita empregando o penta-picnômetro e foi obtido $2,72 \text{ g/cm}^3$ para o solo analisado.

A permeabilidade do solo é a propriedade que representa uma maior ou menor dificuldade com que a percolação da água ocorre através dos poros do solo. Materiais com partículas de elevado diâmetro possuem uma grande porosidade o que facilita o fluxo de água e ar através do solo, apresentando uma maior permeabilidade, enquanto nos materiais mais finos, como as argilas, a água e o ar apresentam uma maior dificuldade de percolação, reduzindo a permeabilidade do solo.

Por meio do ensaio de permeabilidade com carga variável o solo apresentou permeabilidade $K_T = 2,46 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$. A temperatura é um fator que influencia diretamente na permeabilidade dos solos, tendo em vista que quanto maior for a temperatura, menor será a viscosidade da água e, portanto, mais facilmente ela escoar pelos vazios de solo com um correspondente aumento do coeficiente de permeabilidade. Por isso, os valores de k são referidos à temperatura uma temperatura padrão de 20°C e, para o solo do posto $K_{20} = 2,26 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$. Com base nos valores de permeabilidade encontrados e na escala apresentada a seguir, pode-se classificar o solo como um solo de baixa permeabilidade.



Estudos mostram que o transporte de gás através da zona vadosa pode ser influenciado pelo teor de umidade devido a variações na permeabilidade gasosa, diferenças de fases e biodegradação aeróbia (Nerantzis & Dyer, 2009). Por isso, o teor de umidade é um importante parâmetro físico para análise da viabilidade de determinada técnica de remediação.

Por meio do perfil de umidade apresentado na Figura 4.9 observa-se uma umidade média de aproximadamente 8%. Essa baixa umidade é favorável à aplicação de técnicas que utilizem a

injeção e a extração de vapor, pois a baixa umidade acarreta em uma maior porcentagem de ar nos vazios de solo, favorecendo o fluxo gasoso. Cabe salientar que o acréscimo de umidade na profundidade de 2 metros não foi notado durante a coleta das amostras.

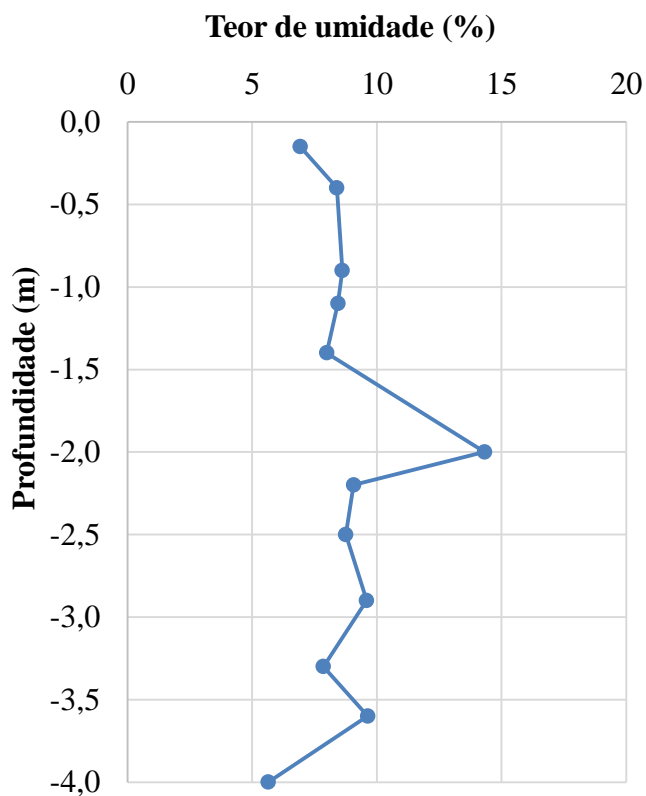


Figura 4.9. Perfil de umidade obtido na sondagem de junho de 2018.

5. PROPOSTA DE SISTEMA DE REMEDIAÇÃO AMBIENTAL

As análises de água dos poços do posto advertem que o local encontra-se contaminado há pelo menos 12 anos. Nesse período foi implantado um sistema de remediação ambiental que resultou no controle da pluma de contaminação e na redução das concentrações dos poluentes, porém, esse sistema de remediação não obteve sucesso na efetiva remediação do local, encontrando-se o mesmo, contaminado, oferecendo risco à saúde das pessoas que frequentam o local e ao meio ambiente.

Esse item apresenta uma proposta de sistema de remediação ambiental para o posto, visando a remediação da área contaminada por BTEX e PAH, e adequação à legislação vigente. O sistema de remediação ambiental é composto por técnicas de remediação com eficiência comprovada na literatura e selecionadas a partir das características da área de estudo.

O aumento da concentração de contaminantes ao longo das análises de água subterrânea, a existência de uma pluma de contaminação em fase livre e o histórico de vazamentos dos tanques subterrâneos de combustível, levam a crer da possível existência de uma fonte de contaminação que continua emitindo poluentes no solo e na água subterrânea. Ainda há incertezas a respeito da fonte de contaminação, podendo ser tanto o próprio tanque de combustível como o solo, que durante tantos anos foi receptor da contaminação e, após ter absorvido uma grande quantidade de produto, realiza sua liberação gradualmente, acarretando em uma contaminação que perdura ao longo do tempo mesmo tendo cessado os vazamentos do tanque.

A caracterização do meio físico mostrou que o solo possui um elevado teor de areia e é composto principalmente por uma areia fina. Já a caracterização pedológica expôs que o Posto está situado em uma região de cambissolo e areias quartzosas. Esse item ainda apresentou um estudo realizado por Zytner (1994) em que o autor analisou a capacidade de solos arenosos em reter contaminantes do tipo BTEX e observou que esse tipo de solo apresentou uma baixa capacidade em sorver BTEX. Nesse sentido, entende-se que seja pouco provável que o solo seja a fonte de emissão de poluentes, e, portanto, levanta hipótese que a fonte de contaminação possa ser os tanques de combustível.

Além dos danos à saúde e ao meio ambiente, a suposição de vazamento de combustíveis originados dos tanques de subterrâneos representa, também, um dano econômico, já que tais

vazamentos acarretam em perdas de combustíveis para o meio ao invés de estarem sendo comercializados.

Posto isso, recomenda-se que antes da implantação do sistema de remediação sejam realizados testes de estanqueidade nos tanque subterrâneos para verificar se há vazamentos no mesmo. Também se recomenda a execução de testes de análise de solo na zona vadosa para averiguar a intensidade da contaminação no solo. Após isso será possível detectar a fonte de contaminação e adotar procedimentos para impedir a continuidade da poluição. O processo de remediação ambiental só será eficiente se cessada a fonte de contaminação.

Os tanques de combustível estão situados na zona vadosa do solo e as análises de contaminantes foram realizadas para a água subterrânea, na zona saturada do solo. Comprovada a contaminação da água subterrânea, entende-se que houve uma migração do contaminante da zona vadosa para a zona saturada. Portanto, é necessário um conjunto de técnicas que atue tanto na zona vadosa quanto na zona saturada do solo. Esse critério é muito importante por que existindo uma fonte de contaminação, a na zona vadosa também estará contaminada, e consequentemente, contaminará a zona saturada.

Para aplicação de técnica de remediação na zona saturado do solo é fundamental ter um profundo conhecimento do nível do lençol freático. Para esse fim, são necessárias consecutivas medições para melhor compreensão de seu comportamento. O 4.1.5 apresenta o nível do lençol freático de diversos poços do posto, tendo conhecimento desse parâmetro é possível dimensionar os componentes da técnica de remediação.

A escolha da técnica de remediação levou em conta a destinação futura da área após a efetiva remediação. A destinação futura da área compreende-se na continuidade das atuais atividades realizadas no local: venda de combustíveis, pequenas manutenções automotivas e a continuidade do pequeno comércio existente no local, com restaurantes e lojas. Por essa razão, as técnicas de remediação *in situ* se mostram mais vantajosas se comparadas com as técnicas *ex situ*, principalmente por oferecer menor intervenção nas atividades do Posto, causando menores distúrbios no local. Além desse tipo de técnica apresentar menores custos.

Dessa forma, propõe-se a técnica *air sparging* associada à técnica de extração de vapor do solo (AS/EVS) para remediação do local contaminado com BTEX, principalmente por benzeno. O processo de seleção dessa associação de técnicas para a recuperação do posto levou em conta o histórico de contaminação, as características físicas e químicas do

contaminante, as características físicas do solo, o tipo de solo, a extensão e a localização da pluma de contaminação, a presença de contaminante em fase livre, a direção de fluxo e a profundidade do lençol freático. Além da existência de poços perfurados no local contaminado, tornando o processo de remediação menos oneroso. A Figura 5.1 apresenta um modelo conceitual de funcionamento do sistema de remediação AS/EVS.

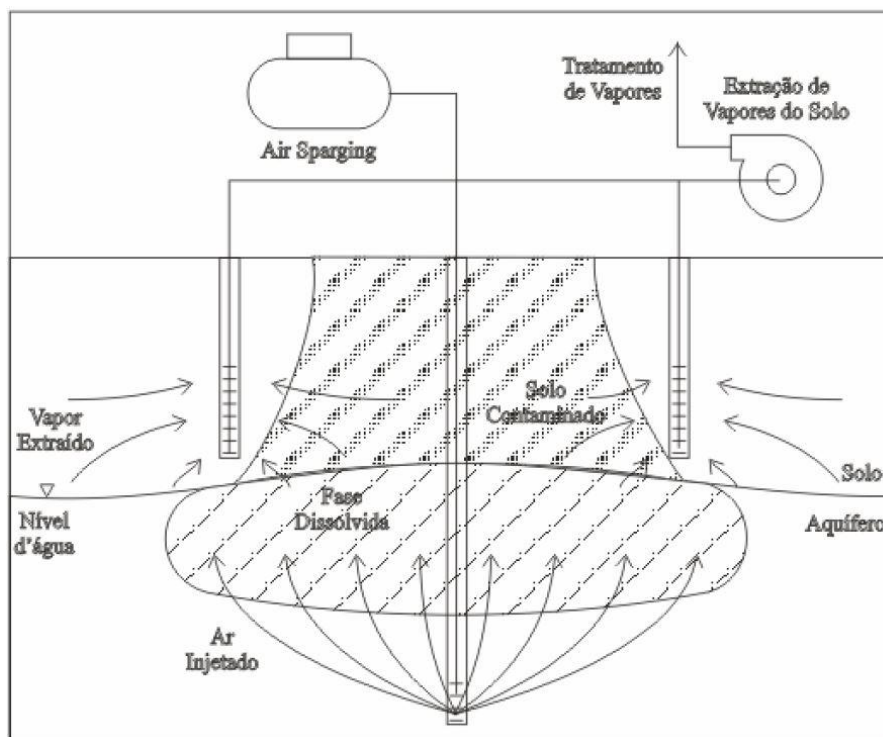


Figura 5.1. Modelo conceitual de funcionamento do sistema de remediação AS/EVS (Viana Jr *et al.*, 2004).

Segundo a FRTR (2002), as técnicas *air sparging* e extração de vapor do solo apresentam: um elevado estado de desenvolvimento tecnológico, garantindo a eficiência da técnica; uma alta confiabilidade de remediação associada a uma baixa necessidade de uma nova intervenção no local, caso a fonte de contaminação seja cessada; custo inferior às demais técnicas; e menor tempo requerido para remediação. É importante destacar que esses parâmetros variam de acordo com as características da área contaminada, porém, essas técnicas destacam-se nesses critérios se comparadas com as demais técnicas.

Mccray & Falta (1996) revelam que a técnica *air sparging* é muitas vezes utilizada acompanhada de um sistema de extração de vapores do solo, pois o ar é ventilado para a zona vadosa do solo e recolhido por este sistema, aumentando a eficiência da técnica.

Essa associação de técnicas possui eficiência comprovada na remediação de áreas contaminadas com BTEX. Em um estudo realizado por Hansen (2013) foi analisada uma área de 1100 m² contaminada com BTEX e que para remediação do local foi utilizada a associação AS/EVS. Hansen (2013) observou uma eficiência de 99,7% na remoção de éter-metil-terc-bútlico, 98,9% na remoção de benzeno, 90,6% na remoção de tolueno e 78,9% para xilenos.

Com base na análise de março de 2017, para atendimento dos valores de investigação exigidos pela resolução CONAMA 420/09 o sistema AS/SVE deve ter eficiência de remoção mínima de 99,24% de benzeno, 46,81% de xileno e 12,28% de etilbenzeno.

Um estudo realizado por Viana Jr *et. al* (2004) descreveu um sistema de remediação ambiental que atuou na descontaminação de um posto de serviço que foi impactado por gasolina. O sistema de remediação utilizou as técnicas de extração de vapores do solo e *air sparging*. O estudo constatou a eficiência do sistema de remediação na remoção do contaminante orgânico existente em fase livre, comprovando a eficiência dessa associação de técnicas para remover poluentes presentes nessa fase.

O sistema contou com cinco poços de extração de vapores e cinco poços de injeção de ar na água subterrânea. Viana Jr *et. al* (2004) notaram que o ar circulado trouxe para as proximidades dos poços misturas gasosas mais ricas em oxigênio. Assim, o sistema de remediação promoveu a diminuição das concentrações de compostos orgânicos voláteis (COV) do solo através dos princípios de arraste, volatilização e degradação biológica, favorecida pelo aumento das concentrações de oxigênio gasoso nos poros do solo.

Um estudo piloto de Kirtland *et al.* (2001) avaliou a técnica de *air sparging* associada à extração de vapor do solo na remoção hidrocarbonetos de petróleo (PHC) em solo saprolítico. Operando por três anos e meio, o sistema removeu uma estimativa de 19.000 kg de PHC e 5.300 g de BTEX. Kirtland *et al.* (2001) observaram que a biorremediação foi responsável pela remoção de 23% do total de contaminante extraído da área contaminada.

Embora o revolvimento de ar na matriz de solo favoreça e estimule o processo de biorremediação natural, as técnicas *air sparging* e EVS possuem como mecanismo de remediação processos puramente físicos, baseados na volatilização e transporte do contaminante. Além do mais, para estimar a biorremediação natural da área de estudo seria necessário um estudo detalhado da biota do solo do local, para assim, ter conhecimento dos

tipos de microrganismos existentes no solo do Posto e se esses são eficientes na decomposição de derivados de hidrocarbonetos.

As características físicas do local influenciam diretamente na eficiência dessas técnicas de remediação. Quanto a isso, a permeabilidade do solo, ou seja, a capacidade que o solo possui de permitir o escoamento de ar entre os seus espaços vazios, é uma das principais limitações das técnicas propostas. Por meio da caracterização do meio físico, o solo do local apresentou permeabilidade de $2,46 \times 10^{-6}$ m/s, resultado favorável para a aplicação das técnicas. Segundo Lecomte (1999), alguns autores indicam que para o uso de técnicas de bombeamento ou injeção de líquido ou gás, o solo contaminado deverá ter permeabilidade mínima de 10^{-7} a 10^{-8} m/s.

Outro importante parâmetro físico é o teor de umidade. Nerantzis & Dyer (2009) estudaram a influencia do teor de umidade do solo no transporte de vapores de BTEX através da zona vadosa, e concluíram que um alto teor de umidade pode obstruir significativamente o transporte gasoso de compostos derivados de combustíveis, como o BTEX, na zona não saturada. Isso por que um elevado teor de umidade representa o preenchimento dos vazios de solo com água, se transformando em uma barreira natural para o fluxo gasoso. Na etapa de caracterização do meio físico foi obtido um teor de umidade de aproximadamente 8%. A baixa umidade obtida é favorável para aplicação das técnicas.

Durante a caracterização do meio físico, pelo ensaio de granulometria, foi observado que o solo é composto principalmente por uma areia fina. A caracterização pedológica mostrou que aproximadamente metade da área do Posto está situada em área de solo classificado como areia quartzosa. Solos arenosos são solos muito sujeitos à lixiviação, processo que dificulta a retenção do contaminante na matriz de solo e tem como consequência o transporte do mesmo para o lençol freático com maior rapidez. Dito isso, uma associação de técnicas que atue tanto na zona vadosa quanto na zona saturada se mostra muito vantajosa por tratar o contaminante presente nas duas zonas. Cabe ressaltar que a fonte de contaminação se encontra na zona vadosa e as análises de água atestaram a presença de BTEX na zona saturada.

As características do contaminante existente no posto também são favoráveis para aplicação da associação de técnicas proposta, tendo em vista que esse contaminante constitui-se de combustíveis automotivos derivados de petróleo, com uma elevada carga de BTEX. O BTEX são hidrocarbonetos dos combustíveis líquidos derivados de petróleo, de maior mobilidade no

meio ambiente, podendo ser rapidamente transportado através do solo e da água subterrânea devido a sua volatilidade e solubilidade (Costa *et al.*, 2009).

Segundo Neto *et al.* (2000), a aplicabilidade do *air sparging* depende, entre outros fatores, das propriedades dos contaminantes, estes que devem ser voláteis; de fácil partição para a fase gasosa e de fácil remoção num fluxo gasoso. Para Nerantzis & Dyer (2009), os compostos de combustível de petróleo mais voláteis, entre eles o BTEX, podem ser volatilizados nos poros e ocupar os poros da zona não saturada. Daí a necessidade de associação com uma técnica de remoção de vapores da zona não saturada do solo.

Sugere-se que paralelo ao sistema de remediação seja realizado um rigoroso acompanhamento da área. Esse acompanhamento pode ser realizado por meio de análises de água e solo mais frequentes e de constantes inspeções de vazamento nos tanques de armazenamento e outros dispositivos envolvidos no abastecimento, para verificar se estes estão emitindo algum efluente que possa contaminar o solo e a água subterrânea. Assim, executando essas medidas, bem como a aplicação da técnica de remediação proposta, acredita-se que o posto possa remediar o local atualmente contaminado e evitar futuras contaminações.

6. CONCLUSÃO

Primeiramente, para escolha da melhor associação de técnicas de remediação para descontaminação do local poluído há 12 anos, foi realizado um diagnóstico ambiental da área que consistiu na etapa de avaliação preliminar e investigação detalhada. Na fase de avaliação preliminar foram levantados dados do posto de abastecimento onde foi comprovada a contaminação. Na etapa de investigação detalhada foram obtidos novos dados do local e realizou-se uma análise desses dados, servindo de insumo para escolha da associação de técnicas *air sparging* e extração de vapor do solo.

Durante a etapa de investigação detalhada também foi analisada a água do córrego da Ponte, no que se refere aos parâmetros BTEX e PAH. Este que se encontra em conformidade com a legislação ambiental.

Por fim, reitera-se a necessidade de identificação da possível fonte de contaminação existente no local. Isso se dá por meio de análises de água e solo, e através de testes de estanqueidade nos tanques subterrâneos existentes no local. A efetiva remediação do local só será alcançada se for detectada e estancada a fonte de contaminação e houver uma adequada operação do sistema de remediação proposto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDANUR, A. (2005). Remediação de solo e água subterrânea contaminados por hidrocarbonetos de petróleo: estudo de caso na refinaria Duque de Caxias/RJ. Universidade Federal do Paraná.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6502 (1995). Rochas e solos. Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT. 18 p.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 15515-1 (2007). Passivo ambiental em solo e água subterrânea - Parte 1: Avaliação preliminar.

ACKERMANM, M. (2004). Limpeza por meio de extração multifásica de uma área contaminada com vários VOC. Remediação e revitalização de áreas contaminadas. Signus Editora, São Paulo, SP.

ANDRADE, J., AUGUSTO, F., JARDIM, I. (2010). Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. Eclética Química, volume 35, número 3, 43p.

BALDWIN, B.R., NAKATSU, C.H., NEBE, J., WICKHAM, G.S., PARKS, C., NIES, L. (2008). Enumeration of aromatic oxygenase genes to evaluate biodegradation during multi-phase extraction at a gasoline-contaminated site. Journal of Hazardous Materials, 163 vol., 530 p.

BECHARA, G. (2004). Contaminação do solo e água subterrânea por compostos orgânicos. Cetrel Lumina, Soluções Ambientais.

BENTO, F.M., CAMARGO, F.A.O., OKEKE, B., JÚNIOR, W.T.F. (2003). Bioremediation of soil contaminated by diesel oil. Departamento de solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 68 p.

BRASIL, Resolução CONAMA nº357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Publicado no D.O.U nº 53 de 18 de março de 2005.

BRASIL, Resolução CONAMA nº420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas

substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Publicado no D.O.U nº 31 de 13 de fevereiro de 2012.

BRITO, F.V., OLIVEIRA, A.S., NEVES, H.C., AZEVEDO, J.A.T., BHERING, D.L., REIS, S.M., MACHADO, M.C.S., AZEVEDO, G.C., CARVALHAES, G.K. (2005). Estudo da contaminação de águas subterrâneas por BTEX oriundas de postos de distribuição no Brasil. III Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Salvador, BA, 6p.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2016). Texto explicativo relação de áreas contaminadas e reabilitadas no estado de São Paulo. Diretoria de controle e licenciamento ambiental, São Paulo, 14 p.

COSTA, A.H.R., NUNES C.C., CORSEUIL, H. X. (2009). Biorremediação de águas subterrâneas impactadas por gasolina e etanol com o uso de nitrato. Engenharia Sanitária Ambiental, 14 vol, número 2, 265 a 274 p.

COUTINHO, R.C.P., GOMES, C.C. (2014). Técnicas para remediação de aquíferos contaminados por vazamentos de derivados de petróleo em postos de combustíveis. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 20 p.

EMBRAPA (1978). Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, boletim técnico nº 53, Rio de Janeiro.

EMBRAPA (2004). Mapa Pedológico Digital – SIG Atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma Síntese do Texto Explicativo. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Planaltina, DF.

EPA (1994a). How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites, a guide for corrective action plan reviewers: biosparging. United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, chapter VIII, 41 p.

EPA (1994b). How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites, a guide for corrective action plan reviewers: soil vapor extraction. United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, chapter II, 37 p.

EPA (1994). How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites, a guide for corrective action plan reviewers: bioventing. United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, chapter II, 47 p.

EPA (1996). A citizen's guide to natural attenuation. United States Environmental Protection Agency, office of solid waste and emergency response, Washington, DC, 4 p.

EPA (1999). Multi phase extraction: state of the practice. United States Environmental Protection Agency, office of solid waste and emergency response, Washington, DC, 78 p.

EPA (2012). A citizen's guide to thermal treatment. United States Environmental Protection Agency, office of solid waste and emergency response, Washington, DC, 2 p.

EPA (2017). How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites, a guide for corrective action plan reviewers: monitored natural attenuation. United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, chapter IX, 78 p.

FRANK, U., BARKLEY, N. (1995). Remediation of Low Permeability Subsurface Formations by Fracturing Enhancement of Soil Vapor Extraction. Journal of Hazardous Materials, 40 vol., 191-201 p.

FEDERAL REMEDIATION TECHNOLOGY ROUNDTABLE (2002). Remediation Technologies screening matrix and reference guide, 4th ed.

FURTADO, M. (2008). Remediação de solos: Para afastar o perigo que se esconde nos subterrâneos das grandes cidades, meios legais e econômicos devem fomentar obras de descontaminação. Revista Química e Derivados.

HANSEN, E. (2013). Tecnologias de Remediação de Áreas Contaminadas por Hidrocarbonetos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Química, Trabalho de conclusão de curso em engenharia química.

KHAN, F.I., HUSAIN, T., HEJAZI, R. (2004). Na overview and analysis of site remediation Technologies. Journal of environmental management, 71 vol., 28 p.

KIRTLAND, B.C., AELION, C.M., WIDDOWSON, M.A. (2001). Long-Term AS/SVE for Petroleum Removal in Low-Permeability Piedmont Saprolite. Journal of Environmental Engineering, 134 a 144 p.

LEAHY, J.G., COLWELL, R.R. (1990). Microbial degradation of hydrocarbons in the environment. Department of microbiology, University of Maryland, College Park, Maryland, 54 vol., número 3, 11 p.

LECOMTE, P. (1999). Polluted Sites: Remediation of Soils and Groundwater. A.A. Balkema Publishers, Brookfield, 210 p.

LEITE, D.C., CUNHA, A.C.B., BIZANI, D. (2011). Análise de macro e micronutrientes em um estudo comparativo de solo húmico para processos de biorremediação. Revista de Ciências Ambientais. Canoas, 5 vol., número 2, 93 a 102 p.

MARIANO, A.P. (2006). Avaliação do potencial de biorremediação de solos e de águas subterrâneas contaminados com óleo diesel. Instituto de geociências e ciências exatas, Universidade Estadual Paulista, 162 p.

MARTINZ, C.R.O. (2007). Avaliação da estrutura dos postos de revenda de combustíveis do Distrito Federal quanto à geração de resíduos aliada a análise de sua citotoxicidade e genotoxicidade. Tese de doutorado em biologia, Programa de Pós-Graduação em Biologia Aniam, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade de Brasília, Brasília, 109 p.

MAXIMIANO, A.M.S., MORAES, S.L. (2014). Investigação para remediação. Guia de elaboração de planos de intervenção para o gerenciamento de áreas contaminadas. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, SP, 1 vol., 398 p.

MCCRAY, J. E., FALTA, R. W. (1996). Defining the air sparging radius of influence for groundwater remediation. Journal of Contaminant Hydrology, 28 p.

MINDRISZ, A.C. (2006). Avaliação da contaminação da água subterrânea de poços tubulares, por combustíveis fósseis, no município de Santo André, São Paulo: uma contribuição à gestão ambiental. Dissertação de doutorado, Instituto de pesquisas energéticas e nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 155 p.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1993). *In situ* bioremediation (in English). Whashington, D.C., EUA, 225p.

NERANTZIS, P.C., DYER, M.R. (2009). Transporte f BTEX Vapours Through Granular Soils with Different Moisture Contents in the Vadose Zone. Geotech Geol Eng. 13 p.

NETO, F.A.O., SANTOS, P.R.P., GOMES, Z.L.G.C. (2000). Considerações sobre tecnologias para remediação de solos e águas subterrâneas contaminadas e suas aplicações em pólos industriais na região metropolitana de Salvador e antiga fábrica da COBRAC em Santo

Amaro-BA. Curso de especialização em gerenciamento e tecnologias ambientais. Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia. 62 p.

NEVES, A.A.C. (2010). Estudo sobre resíduos sólidos em postos de combustíveis, funilarias e estabelecimentos de lavagem automotiva no município de São Carlos, visando Indicadores de Sustentabilidade. Tese de doutorado em Engenharia Ambiental, Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Ciências e Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 181 p.

NEVES, C.M.M., FARIA, O.B., ROTONDARO, R., SALAS, P.C., HOFFMANN, M. (2005). Seleção de solos métodos de controle em construção com terra – Práticas de campo. Programa Ibero-Americano de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento. PROTERRA, Projeto de Investigação, cap. 14, 31 p.

NOBRE, M.M., NOBRE, C.M. (2003). Remediação de solos: técnicas alternativas melhoram desempenho. Química e derivados, nº 417.

OLIVEIRA, E., (1992). Contaminação de aquíferos por hidrocarbonetos provenientes de vazamentos de tanques de armazenamento subterrâneo. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, USP, 112 p.

OU, Z. (2000). Separate and combined environmental behaviour of surfactants and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH). Institut für Chemie, Technische Universität München, 272 p.

PAPADOPOULOS S., VATSERIS, C. (2005). Air sparging for site remediation. Intergeo-Environmental Technology Ltd., industrial Area of Thermi, Thessaloniki, 11 p.

PENNER, G.C. (2000). Estudos laboratoriais da contaminação do solo por gasolina com o uso de detetor de fotoionização. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP, 109 p.

RENNÓ, C.D., NOBRE, A.D., CUARTAS, L.A., SOARES, J.V., HODNETT, M.G., TOMASELLA, J., WATERLOO, M.J. HAND (2008). A new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*, New York, v.112, n.9, 3469-3481 p.

ROBB, J., MOYER, E. (2001). Natural attenuation of benzene and MTBE at four midwestern retail gasoline marketing outlets. *Contam. Soil Sed. Water*, Spring:67-71.

SANTOS, E., UNGARI, H.C.N., SANTOS, M.B. (2008). Principais técnicas de remediação e gerenciamento de áreas contaminadas por hidrocarbonetos no estado de São Paulo. Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, SP, 129 p.

SOIL TAXONOMY (1975). A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Washington, D.C., USDA.

TATE, R.L (1995). Soil Microbiology. New York, John Wiley, 107 p.

TAVARES, S.R.L. (2013). Remediação de solos e águas contaminadas por metais pesados. Técnicas de remediação, 2 cap., 61-89 p.

TECPAM CONSULTORIA AMBIENTAL (2013). Relatório de Instalação do Sistema de Remediação Ambiental. Brasília, DF.

TECPAM CONSULTORIA AMBIENTAL (2017). Relatório de Monitoramento Ambiental 8. Brasília, DF.

TIBURTIUS, E.R.L., PERALTA-ZAMORA, P.P, EMMEL, A., LEAL, E.S (2004). Degradação de BTXS via processos oxidativos avançados. Quim. Nova, 28 vol., n.1, p. 61-64.

VIANA JR, O., LEITE, V., DAMASI, D. (2004). Remediação ambiental e reciclagem de áreas urbanas contaminadas por hidrocarbonetos de petróleo. XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.

ZYTNER, R.G. (1994). Sorption of benzene, toluene, ethylbenzene and xylenes to various media. Journal of Hazardous Materials, 38, 113 a 126 p.